

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง  
การสงเคราะห์และศึกษาสมบัติทางเคมีของซีโอโลต์เอ



นาย สุรสิทธิ์ กมลกุลอาจารย์

นางสาว พันทิพา พรหมแหงษ์

ป/พ  
๑๕๕๓  
๒๕๓๕

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2535

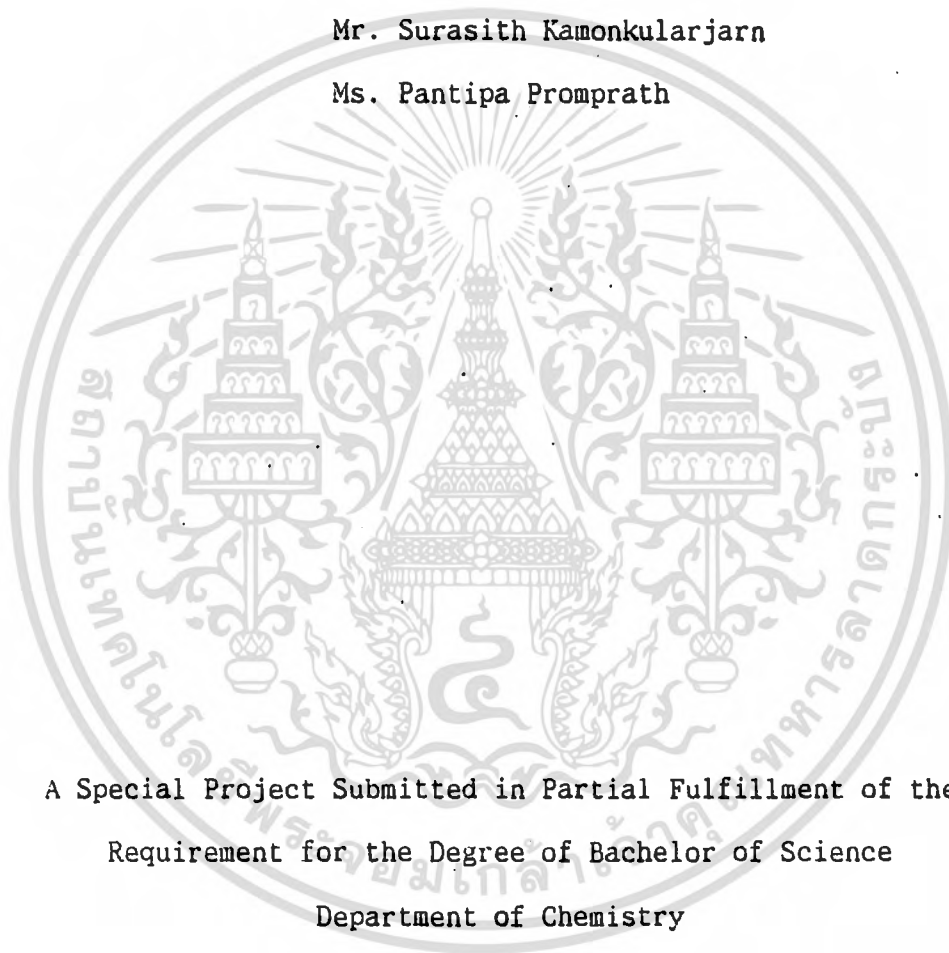
6125391๔๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Synthesis and Study of Chemical Property of Zeolite A

Mr. Surasith Kamonkularjarn

Ms. Pantipa Promprath



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science  
Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์และการศึกษาสมบัติทางเคมีของซีโอไลต์เอ  
โดย นายสุรสิทธิ์ กมลกุลอาจารย์  
นางสาวพันทิพา พรหมแพทย์  
ภาควิชา เคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล  
ผศ.ดร.ศักดา ไตรศักดิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้ับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....*อรุณี คงศักดิ์ไพศาล*.....หัวหน้าภาควิชาเคมี  
( )

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ

.....*พรทิพย์ ศัพทอนันต์*.....ประธานกรรมการ  
( อาจารย์ พรทิพย์ ศัพทอนันต์ )

.....*คณิศา ตั้งคณาภิรักษ์*.....กรรมการ  
( อาจารย์ คณิศา ตั้งคณาภิรักษ์ )

.....*อรุณี คงศักดิ์ไพศาล*.....กรรมการ  
( ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล )

.....*ศักดา ไตรศักดิ์*.....กรรมการ  
( ผศ.ดร. ศักดา ไตรศักดิ์ )

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์และการศึกษาสมบัติทางเคมีของซีโอไลต์เอ

นักศึกษา นาย สุรสิทธิ์ กมลกุลอาจารย์

นางสาว พันทิพา พรหมแพทย์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล

ผศ.ดร. ศักดา ไตรศักดิ์

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2535

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เอด้วยวิธีไฮโดรเจล (Hydrogel process) และวิธีการเปลี่ยนสภาพดินขาว (Clay conversion) วิธีแรกเป็นการทำปฏิกิริยาของโซเดียมอลูมิเนตกับโซเดียมซิลิเกต ที่อุณหภูมิ 90-100 °C ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.67, 2.47, 4.96, 23.73 ตามลำดับ ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ 84.42 วิธีที่สองทำโดยนำเมตาเดอลินที่ได้จากการเผาดินขาวจากแหล่งระนองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ไปทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมอลูมิเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.64, 1.74, 40.0 ตามลำดับ ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ 62.10

ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากทั้งสองวิธีมีสมบัติดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกา ต่ออลูมินาเป็น 1.335 พื้นที่ผิวทั้งหมดภายในรูพรุนเป็น 4.335 และ 1.618 ตารางเมตร ต่อกรัม ปริมาตรทั้งหมดภายในรูพรุนเป็น 0.8748 และ 1.3741 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อกรัม ความหนาแน่น 1.99 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเป็นด่าง 10.88 และ 10.47 และ

มีลำดับการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็น  $\text{Pb}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$  และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธี กับซีโอไลต์เอมาตรฐาน พบว่าซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซีโอไลต์เอมาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง การสังเคราะห์และการศึกษาสมบัติทางเคมีของซีโอไลต์เอ เพื่อเสนอต่อภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมีอุตสาหกรรม โครงการพิเศษนี้สำเร็จ ลุล่วงลงได้ ผู้เสนอได้รับความแนะนำและความช่วยเหลือ จากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการพิเศษนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือดังนี้ คือ

ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล	อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ
ผศ. ศักดา ไตรศักดิ์	อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ
ผศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร. สุพจน์ พัฒนศรี	ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อ. มาลาตี ทัยคุปต์	ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร. อธิชา บวรวัฒนานนท์	ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คุณ ประเสริฐ เขียวพิมพ์	ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คุณ ฐิติ ตัมทสุทธิ	บริษัท คอลเกต-ปาส์มเอิสฟ
คุณ พัทธ์ รัตนจรรักษ์	กรมทรัพยากรธรณี
คุณ ณรงค์ศักดิ์ พัทธ์มวลชน	บริษัท พี แอนด์ เอ็น แอสโซซิเอท จำกัด

อนึ่งยังมีบุคคลที่มีพระคุณอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ผู้เสนอ

โครงการพิเศษขอขอบคุณมาในโอกาสนี้ด้วย

สุรสิทธิ์ กมลกุลอาจารย์

พันทิพา พรหมแพทย์

10 มีนาคม 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

ดัชนีรูป

ดัชนีตาราง

ดัชนีกราฟ

บทที่ 1

บทนำ

บทที่ 2

โครงสร้างของซีโวลต์.....	1
การจำแนกโครงสร้างของซิลิเกต.....	3
ช่องว่างภายในโครงสร้างซีโวลต์.....	8
1. ระบบช่องว่างใน 1 มิติ.....	8
2. ระบบช่องว่างใน 2 มิติ.....	8
3. ระบบช่องว่างใน 3 มิติ.....	9
ความหนาแน่นของโครงร่างผลึกของซีโวลต์.....	10
โครงร่างอลูมินซิลิเกตของซีโวลต์เอ.....	12
การสังเคราะห์ซีโวลต์เอ.....	18
การสังเคราะห์ซีโวลต์เอโดยวิธีไฮโดรเจล.....	18
การสังเคราะห์ซีโวลต์เอจากดินขาว.....	19
สมบัติของซีโวลต์.....	20
(1) สมบัติทางกายภาพ	
1.1 รูปร่าง.....	20
1.2 ขนาดของอนุภาคของซีโวลต์เอ.....	23
1.3 ความหนาแน่น.....	24
1.4 การสั่นในโมเลกุล.....	24
1.5 โครงสร้างผลึกของซีโวลต์.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2)สมบัติทางเคมี

2.1 ปฏิกริยาที่เกิดกับเบสแก่.....	29
2.2 สมบัติในการดูดซับของซีโอโลต์.....	29
2.3 สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอโลต์.....	30

**บทที่ 3**

**การทดลอง**

3.1 การสังเคราะห์ซีโอโลต์จากแร่ดินขาว และ วิธีไฮโดรเจล.....	36
3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชัน .....	38
3.3 การวิเคราะห์สารด้วยเครื่องอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	39
3.4 การวิเคราะห์โดยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป.....	39
3.5 การหาความหนาแน่น.....	39
3.6 การหาค่าความเป็นต่าง.....	40
3.7 การหาพื้นที่ผิวและปริมาตรภายในรูพรุนทั้งหมด.....	40
3.8 การหาค่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของซิลิกาต่ออลูมินา.....	40
3.9 การหาค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก.....	40

**บทที่ 4**

**ผลการทดลองและสรุปผลวิจารณ์**

4.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอโลต์จากแร่ดินขาว และ วิธีไฮโดรเจล.....	41
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชัน.....	42
4.3 ผลการวิเคราะห์สารด้วยเครื่องอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	44
4.4 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป.....	45
4.5 ผลการหาความหนาแน่น.....	48
4.6 ผลการหาค่าความเป็นต่าง.....	50
4.7 ผลการหาพื้นที่ผิวและปริมาตรภายในรูพรุนทั้งหมด.....	50
4.8 ผลการหาค่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของซิลิกาต่ออลูมินา.....	52
4.9 ผลการหาค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก.....	54

**ข้อเสนอแนะ**

**เอกสารอ้างอิง**

**ภาคผนวก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ดัชนีรูป

รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะรูปทรงของน้ำระหว่างออกซิเจนและซิลิกอน.....	3
รูปที่ 2.2	แสดงลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมสี่หน้าซึ่งจับตัว โดยออกซิเจนไอออนกับอลูมิเนียม และซิลิกอนไอออน.....	3
รูปที่ 2.3	แสดงลักษณะหน่วยโครงสร้างของซีโอไลต์.....	5
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะโพรงภายในที่ใหม่ เชื่อมต่อกัน.....	8
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะโพรงภายในที่ เชื่อมต่อกันในสองทิศทาง.....	8
รูปที่ 2.6	แสดงลักษณะโพรงภายในที่ เชื่อมต่อกันในสามทิศทาง.....	9
รูปที่ 2.7	แสดงลักษณะโพรงภายในซีโอไลต์ธรรมชาติที่ เชื่อมต่อกันในสามทิศทาง.....	10
รูปที่ 2.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความหนาแน่น.....	11
รูปที่ 2.9	แสดงลักษณะโครงสร้างที่เป็นวงสี่เหลี่ยมสองวงซ้อนกันภายในซีโอไลต์เอ.....	12
รูปที่ 2.10	แสดงลักษณะรูปทรงกรวยแบนหน้า.....	12
รูปที่ 2.11	แสดงแบบจำลองโครงสร้างของซีโอไลต์เอ.....	13
รูปที่ 2.12	แสดงลักษณะการเกิดซีโอไลต์ (ซีโอไลต์เอ็กซ์).....	17
รูปที่ 2.13	แสดงระยะเวลาของการเกิดผลึกซีโอไลต์เอและเอ็กซ์ วัดโดยวิธี X-ray powder.....	18
รูปที่ 2.14	แสดงการเกิดผลึกซีโอไลต์เอที่เวลาต่างๆกัน.....	21
รูปที่ 2.15	แสดงรูปทรงผลึกแบบ penetration twining ของซีโอไลต์เอ.....	22
รูปที่ 2.16	แสดงลักษณะผลึกของซีโอไลต์เอ็กซ์เป็นแบบ spinel-type.....	22
รูปที่ 2.17	แสดงค่าการกระจายของขนาดของซีโอไลต์เอ.....	23
รูปที่ 2.18	แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์เอ.....	23
รูปที่ 2.19	แสดงสเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์ และไฮดรอกซีเซดาไลต์.....	26
รูปที่ 2.20	(ซ้าย) แสดงโมเลกุลเล็กถูกดูดซับ.....	30
	(ขวา) แสดงโมเลกุลใหญ่ไม่ถูกดูดซับ.....	30
รูปที่ 2.21	กราฟของการแลกเปลี่ยนไอออน.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ดัชนีรูป

รูปที่ 2.22	แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ.....	33
รูปที่ 2.23	แสดงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อการแลกเปลี่ยนไอออน.....	34
รูปที่ 3.1	แสดงเครื่องมือ.....	37
รูปที่ 4.1	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของดินขาวที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125 <sup>o</sup> c	
รูปที่ 4.2	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของดินระนองที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 650 <sup>o</sup> c	
รูปที่ 4.3	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของดินระนองที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 750 <sup>o</sup> c	
รูปที่ 4.4	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของดินนราธิวาสที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125 <sup>o</sup> c	
รูปที่ 4.5	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของดินนราธิวาสที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 650 <sup>o</sup> c	
รูปที่ 4.6	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของดินนราธิวาสที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 750 <sup>o</sup> c	
รูปที่ 4.7	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอมาตราฐาน	
รูปที่ 4.8	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (18% NaOH 70 <sup>o</sup> c-90 <sup>o</sup> c)	
รูปที่ 4.9	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (18% NaOH 90 <sup>o</sup> c-100 <sup>o</sup> c)	
รูปที่ 4.10	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (18% NaOH 100 <sup>o</sup> c-120 <sup>o</sup> c)	
รูปที่ 4.11	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (14% NaOH 70 <sup>o</sup> c-90 <sup>o</sup> c)	
รูปที่ 4.12	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (14% NaOH 90 <sup>o</sup> c-100 <sup>o</sup> c)	
รูปที่ 4.13	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (14% NaOH 100 <sup>o</sup> c-120 <sup>o</sup> c)	
รูปที่ 4.14	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของไฮดรอกซีโซดาไลต์	
รูปที่ 4.15	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระนองที่เผาที่อุณหภูมิ 650 <sup>o</sup> c	
รูปที่ 4.16	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระนองที่เผาที่อุณหภูมิ 750 <sup>o</sup> c	
รูปที่ 4.17	รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินนราธิวาสที่เผาที่อุณหภูมิ 650 <sup>o</sup> c	

## ดัชนีรูป

- รูปที่ 4.18 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินนราธิวาสที่เผาที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$
- รูปที่ 4.19 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งระนองที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิห้อง
- รูปที่ 4.20 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งระนองที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- รูปที่ 4.21 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งระนองที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- รูปที่ 4.22 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งนราธิวาสที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิห้อง
- รูปที่ 4.23 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งนราธิวาสที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- รูปที่ 4.24 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งนราธิวาสที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- รูปที่ 4.25 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอมาตรฐาน
- รูปที่ 4.26 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (18% NaOH  $90^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$ )
- รูปที่ 4.27 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (18% NaOH  $70^{\circ}\text{C}$ - $90^{\circ}\text{C}$ )
- รูปที่ 4.28 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (14% NaOH  $70^{\circ}\text{C}$ - $90^{\circ}\text{C}$ )
- รูปที่ 4.29 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (14% NaOH  $90^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$ )
- รูปที่ 4.30 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระนองที่เผาที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$
- รูปที่ 4.31 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระนองที่เผาที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$
- รูปที่ 4.32 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินนราธิวาสที่เผาที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$
- รูปที่ 4.33 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินนราธิวาสที่เผาที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$
- รูปที่ 4.34 แสดงซีโอไลต์เอมาตรฐานกา ลังขยาย 20000 เท่า
- รูปที่ 4.35 แสดงซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก 14 % NaOH  $70^{\circ}$ - $90^{\circ}\text{C}$  กา ลังขยาย 10000 เท่า
- รูปที่ 4.36 แสดงซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก 18% NaOH  $90^{\circ}$ - $100^{\circ}\text{C}$  กา ลังขยาย 10000 เท่า
- รูปที่ 4.37 แสดงซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระนองที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  กา ลังขยาย 10000 เท่า
- รูปที่ 4.38 แสดงซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินนราธิวาสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  กา ลังขยาย 10000 เท่า

# ดัชนีตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดงซีโอโลต์ทั้งเจ็ดกลุ่ม.....	4
ตารางที่ 2.2	แสดงการแบ่งกลุ่มของซีโอโลต์.....	6
ตารางที่ 2.3	แสดงซีโอโลต์สังเคราะห์ที่ยังไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอน.....	7
ตารางที่ 2.4	แสดงสมบัติของซีโอโลต์เอ.....	14
ตารางที่ 2.5	แสดงซีโอโลต์สังเคราะห์ในระบบ $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ .....	16
ตารางที่ 2.6	แสดงซีโอโลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเมตาเคอลินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์... ..	20
ตารางที่ 2.7	แสดงผลของไอออนบวกที่มีต่อปริมาณของรูพรุนในซีโอโลต์เอ.....	24
ตารางที่ 2.8	แสดงตำแหน่งของสเปคตรัม.....	25
ตารางที่ 2.9	แสดงสเปคตรัมอินฟราเรดของซีโอโลต์สังเคราะห์.....	27
ตารางที่ 2.10	แสดงรูปแบบของเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอโลต์เอ.....	28
ตารางที่ 2.11	แสดงค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอโลต์.....	33
ตารางที่ 4.1	แสดงเบอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ซีโอโลต์จากดินขาว... ..	41
ตารางที่ 4.2	แสดงค่ามุม 2 $\theta$ และความสูงของพีค(%).....	42
ตารางที่ 4.3	แสดงผลความหนาแน่นของดินขาวก่อนนำมาทำการสังเคราะห์.....	48
ตารางที่ 4.4	แสดงผลความหนาแน่นของซีโอโลต์ก่อนนำมาทำการสังเคราะห์.....	49
ตารางที่ 4.5	แสดงค่า pH ของดินขาวก่อนทำการสังเคราะห์และผลิตภัณฑ์ซีโอโลต์ ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีต่าง ๆ.....	50
ตารางที่ 4.6	แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรภายในรูพรุนทั้งหมดของซีโอโลต์.....	51
ตารางที่ 4.7	แสดงอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา.....	52
ตารางที่ 4.8	แสดงค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก.....	54
ตารางที่ 4.9	แสดงคุณสมบัติต่างๆของซีโอโลต์เอมาตรฐานและซีโอโลต์เอสังเคราะห์..	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ซีโอไลต์ (zeolites) เป็นแร่ที่รู้จักกันมานานกว่า 200 ปี ซีโอไลต์มาจากภาษากรีก 2 คำ คือ "zeo" ที่แปลว่า การต้ม และ "lithos" ที่แปลว่า หิน (1) ซึ่งเริ่มมาขึ้นปี ค.ศ. 1756 โดย ครอนสเตดท์ (Constedt) (2)

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบของโลหะหมู่ที่ 1 หรือหมู่ที่ 2 ของสารประกอบออลูมิโนซิลิเกต ที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างผลึกที่มีคุณสมบัติหลายประการ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นตะแกรงโมเลกุล และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในปี ค.ศ. 1845 เวย์ (Way) ได้ศึกษาพบว่า มีดินบางชนิดสามารถดูดซับแอมโมเนียมาได้ (3) ซึ่งเบรค (Breck) (4) ได้อธิบายว่าเป็นเพราะมีองค์ประกอบของซิลิเกตที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างของดิน จึงทำให้สามารถดูดซับแก๊สแอมโมเนียมาได้ นับได้ว่าเป็นการทดลองครั้งแรกในการทดสอบคุณสมบัติของการแลกเปลี่ยนไอออน

ต่อมาในปี 1925 ไวน์เกล และสไตน์โฮฟ (Weigel and Steinhoff) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติในการเลือกจับโมเลกุลของสารอินทรีย์ของคาบาซิท (Chabazite) (5) และในช่วงสองทศวรรษถัดมา (ค.ศ. 1940-1960) บาร์เรอร์ (Barrer) ได้ทำการศึกษาชนิดของตะแกรงโมเลกุลและศึกษาสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของตะแกรงโมเลกุล (6) ซึ่งเบรคก็ได้ยืนยันผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดอะแนลซิม (analcime) ของบาร์เรอร์ โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน (7) ในช่วงแรกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะทำได้ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง เบรคและทีมงานบริษัทยูนิเวนคาร์โบด์ ก็ได้พัฒนาเทคนิคโดยใช้อุณหภูมิและความดันที่ต่ำลงมา (7)

ตั้งแต่ปี 1980 เป็นต้นมาได้มีการค้นพบซีโอไลต์จากธรรมชาติมากกว่า 40 ชนิด และซีโอไลต์สังเคราะห์มากกว่า 100 ชนิด และได้มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง (8) เช่น การบำบัดน้ำเสีย การเกษตร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งมีการใช้อย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมการทำผงซักฟอก ถ่างจัดน้ำเสีย การเกษตร ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอนี้ สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง คือ วิธี Clay conversion (9) และวิธี Hydrogel process (10)

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจาก 2 วิธีดังกล่าว และได้ทำการศึกษสมบัติทางกายภาพ เพื่อระบุชนิดของซีโอไลต์เอ โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี, เทคนิคเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชัน และ เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป และศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ เช่น รูปร่าง ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่น โครงสร้างของผลึก เพื่อที่จะนำซีโอไลต์เอทีไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

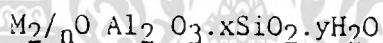


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นผลึกอลูมิโนซิลิเกตของโลหะหมู่ 1 และ 2 เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม ซึ่งมีน้ำผลึกอยู่ ซีโอไลต์มีโครงสร้างผลึกเป็นอลูมิโนซิลิเกตที่ต่อกันไปอย่างไม่มีที่สิ้นสุดในสามมิติของรูปทรงสี่หน้าของ  $AlO_4$  และ  $SiO_2$  ที่มีการใช้ออกซิเจนร่วมกัน ซีโอไลต์อาจแสดงได้โดยสูตรอย่างง่ายดังนี้



โดยให้  $x$  บกติแล้วเท่ากับหรือมากกว่า 2 ซึ่ง  $AlO_4$  จะต่อกับเฉพาะ  $SiO_4$  เท่านั้น  $n$  เป็นเลขประจุของประจุบวก

จากโครงสร้างพื้นฐานของซิลิกอน (Silicon) เมื่อ  $Al^{3+}$  เข้าไปแทน  $Si^{4+}$  ในโครงสร้างจะทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ที่เป็นโครงสร้างที่มีประจุลบจำนวนมาก (polyanionic framework) มีองค์ประกอบเป็น  $[(Al_xSi_{4-x})O_2]^{x-}$  จะเห็นว่าจะเกิดประจุลบขึ้น ซึ่งประจุลบนี้จะถูกทำให้สมดุลได้โดยการใส่ประจุบวกเข้ามา ประจุบวกที่ใส่เข้ามานี้ คือโลหะอัลคาไล หรืออัลคาไลเอิร์ธ ดังสมการข้างล่างนี้



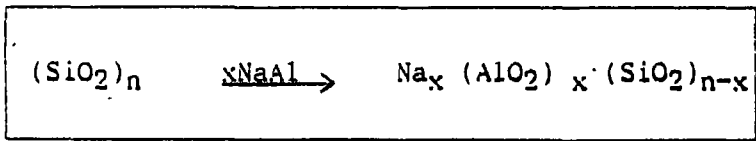
(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M = โลหะ (Cation) ที่มีประจุ + m

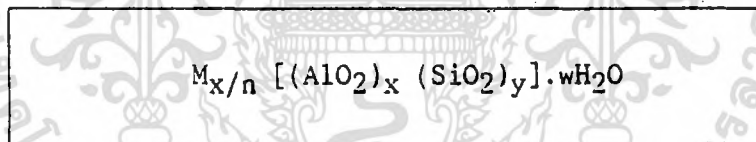
X = จำนวนอะตอมของอลูมิเนียม (Al)

ถ้า M = โซเดียม เราจะเขียนสมการเคมีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



อัตราส่วนของ O/(Al+Si) ในโครงสร้างผลึกจะมีค่าเท่ากับ 2 ในโครงสร้างของซิลิเกตจะมีทั้งช่องว่างและรูที่ต่อเชื่อมกัน ซึ่งจะเติมไปด้วยประจุบวกและโมเลกุลของน้ำ ซึ่งประจุบวกนี้สามารถเคลื่อนที่ หรือเกิดการแลกเปลี่ยนกับประจุบวกอื่น ๆ ได้ น้ำที่อยู่บนผลึกของซิลิเกตก็สามารถเคลื่อนย้ายได้เช่นกัน ในซิลิเกตหลาย ๆ ชนิดทั้งซิลิเกตจากแร่และจากการสังเคราะห์ การแลกเปลี่ยนประจุบวกหรือการใส่น้ำออกอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างได้ ประจุบวกของแอมโมเนียม หรือ อัลคิลแอมโมเนียมอาจถูกจัดไว้ในประเภท ซิลิเกตสังเคราะห์ เช่น  $NH_4^+$ ,  $CH_3$ ,  $NH_3$ ,  $(CH_3)_2NH_2$  เป็นต้น ในซิลิเกตสังเคราะห์บางชนิด อลูมิเนียมอาจถูกได้ด้วยไอออนชนิดอื่น เช่น แคลเซียม ไอออนและซีลีเนียมไอออน อาจถูกแทนที่ได้ด้วยเจอร์มาเนียมหรือฟอสฟอรัสไอออนได้

สูตรโครงสร้างของซิลิเกตมักถูกแสดงในรูปของหน่วยเซลล์ของผลึก ดังนี้



M เป็นไอออนบวกที่มีประจุ n

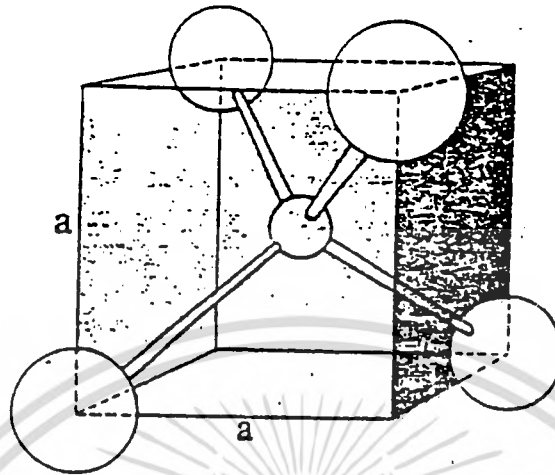
w เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำ

อัตราส่วนของ y/x บกตีแล้วมีค่าระหว่าง 1-5 ขึ้นกับโครงสร้างของผลึก และผลรวม (x+y) จะเท่ากับจำนวนของรูปทรงสี่หน้าทั้งหมดในหน่วยเซลล์

เครื่องหมาย [ ] แสดงถึงองค์ประกอบในโครงสร้างหลัก

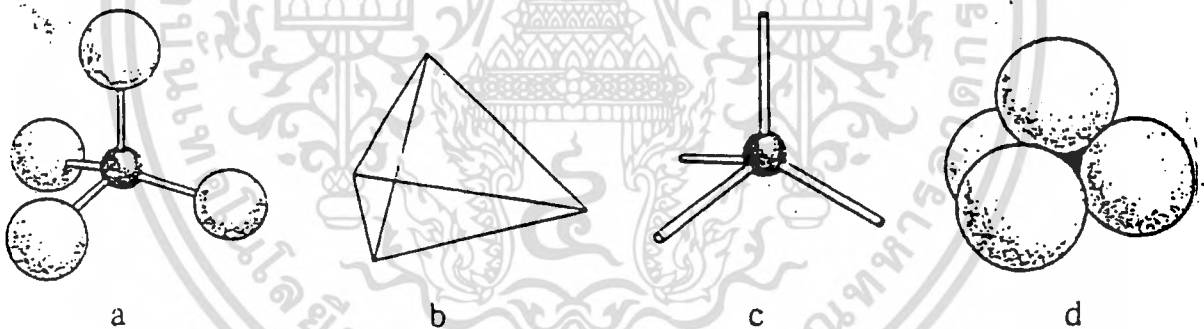
## การจําแนกโครงสร้างของซิลิเกต

การเข้าใจโครงสร้างของ Zeolite จะต้องเข้าใจถึงโครงสร้างของซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกต ปกติโครงสร้างของซิลิเกตจะอยู่ในรูปเทตตระฮีดรอนของ  $\text{SiO}_4$  ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงรูปทรงของน้ำระหว่างออกซิเจนและซิลิกอน ซึ่งมีประจุรวมเป็น  $4^-$  สามารถแทนซิลิกอนได้ด้วย  $\text{Al}^{3+}$  ซึ่งจะมีประจุรวมทั้งหมดเป็น  $5^-$   
(จาก Breck , 1974 , Fig.2.1)

เราสามารถหาใช้แบบจำลองแสดงถึงโครงสร้างของซิลิเกตได้ 4 ชนิด ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้าซึ่งจับตัวโดย ออกซิเจนไอออน กับอลูมิเนียมและซิลิกอนไอออน

- (a) แสดงถึงแบบจำลอง (ball and stick model)
- (b) รูปทรงสี่หน้าของแข็ง (solid tetrahedron)
- (c) รูปทรงเทตตระฮีดรอน (skeletal tetrahedron)
- (d) แบบจำลอง (Space filling model)

(จาก Breck, 1974 , Fig.2.2)

(3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์แต่ละตัวจะมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เฉพาะของตน สมบัติเหล่านี้ เช่น

1. มีสมบัติในการดูดซับน้ำได้มาก
2. เมื่อทำการไล่น้ำออกจากแอมเลกุลแล้วจะมีความหนาแน่นต่ำและมีปริมาตรของช่องว่างมาก
3. ผลึกมีความเสถียรภาพเมื่อทำแห้งและปริมาตรของช่องว่างที่เกิดขึ้นจะมีมากเมื่อคิดเป็นร้อยละ จะได้ว่าอาจมีมากถึง 50%
4. มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
5. เมื่อไล่น้ำภายในออกจนหมดก็จะได้ molecular - size channels ที่มีขนาดและรูปร่างเหมือน ๆ กัน
6. สมบัติทางกายภาพอื่น ๆ เช่น การเป็นตัวนำทางไฟฟ้า (electrical conductivity)
7. สามารถดูดซับแก๊สและไอ
8. มีสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

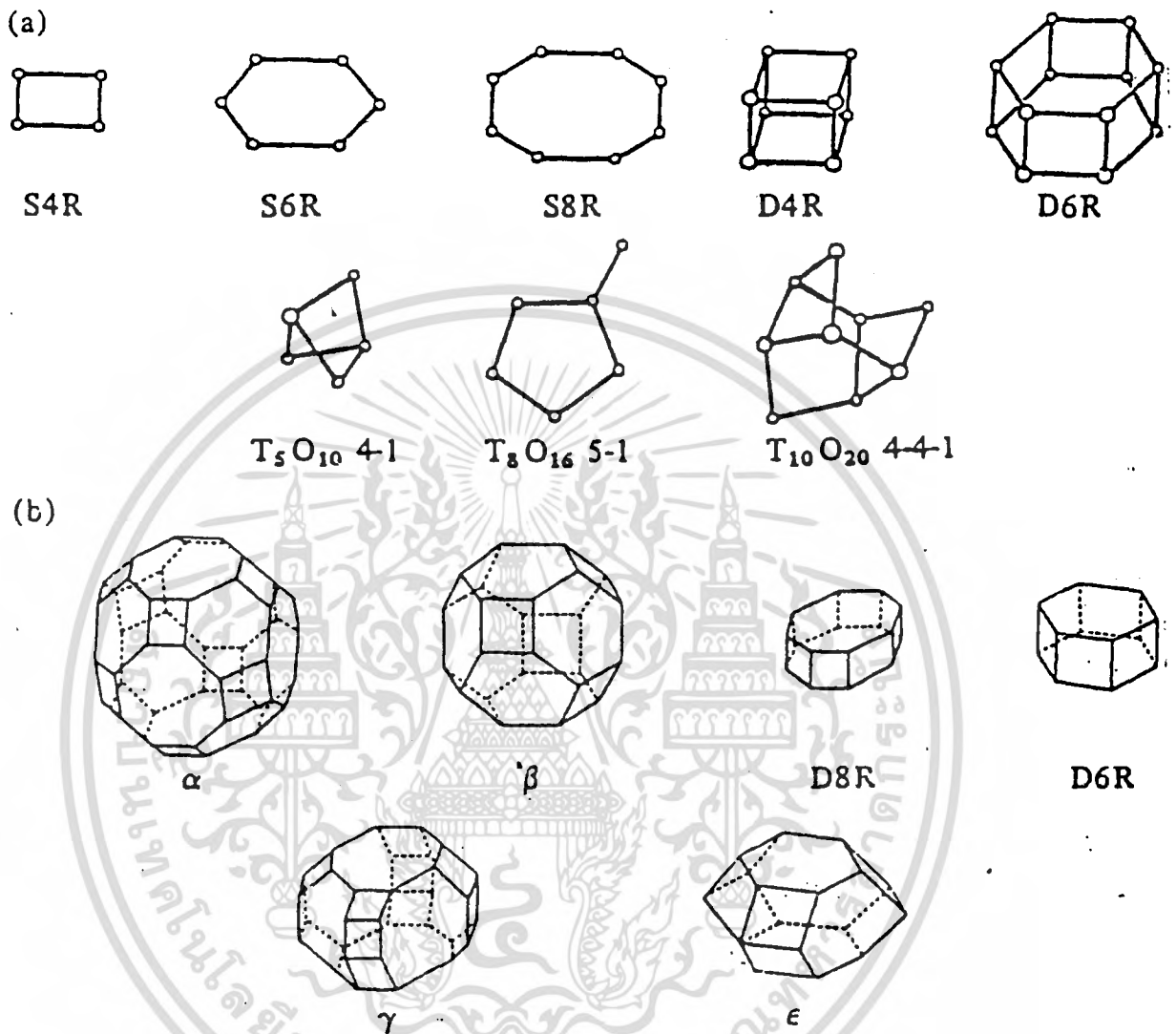
Breck and Meier and Fischer และ Smith แบ่งโครงสร้างของซีโอไลต์ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐาน  $\text{SiO}_4$  เป็น 7 ชนิด เรียกว่า โครงสร้างทุติยภูมิ (secondary building units (SBU) ดังตารางที่ 2.1 ตารางที่ 2.1 แสดงซีโอไลต์ทั้ง 7 กลุ่มของเบ็คค

GROUP	SECONDARY BUILDING UNIT (SBU)
1	Single 4-ring, S4R
2	Single 6-ring, S6R
3	Double 4-ring, D4R
4	Double 6-ring, D6R
5	Complex 4-1, T <sub>5</sub> O <sub>10</sub> unit
6	Complex 5-1, T <sub>8</sub> O <sub>16</sub> unit
7	Complex 4-4-1, T <sub>10</sub> O <sub>20</sub> unit

(จาก Breck , 1974 , Table of SBU , p. 47.)

(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 (a) แสดงลักษณะของหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ

(b) แสดงรูปหลายหน้าภายในโครงร่างผลึกซีโอไลต์

(จาก Breck , 1974 , Fig. 2.18.)

(5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์สามารถแบ่งได้เป็น 7 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังตารางที่ 2.2 และยังมีซีโอไลต์อีก

หลายชนิดที่ยังไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอน ดังตารางที่ 2.3

Name	Typical Unit Cell Contents	Type of Polyhedral Cage <sup>a</sup>	Framework Density, g/cc <sup>b</sup>	Void Fraction <sup>c</sup>	Type of Channels <sup>d</sup>	Free Aperture of Main Channel, Å <sup>e</sup>
<b>Group 1 (S4R)</b>						
Analcime	Na <sub>16</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 16 H <sub>2</sub> O		1.85	0.18	One	2.6
Harmotome	H <sub>24</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 12 H <sub>2</sub> O		1.59	0.31	Three	4.2 x 4.4
Phillipsite	(K, Na) <sub>10</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 20 H <sub>2</sub> O		1.58	0.31	Three	4.2 x 4.4, 2.8 x 4.1
Gismundine	Ca <sub>4</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> ] · 16 H <sub>2</sub> O		1.52	0.46	Three	3.1 x 4.4
P	Na <sub>6</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> ] · 15 H <sub>2</sub> O		1.57	0.41	Three	3.5
Paulingite	(K <sub>2</sub> , Na, Ca, Ba) <sub>76</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>152</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>320</sub> ] · 700 H <sub>2</sub> O	α, β, γ, δ, (10-hedron)	1.54	0.49	Three	3.9
Laumontite	Ca <sub>4</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> ] · 16 H <sub>2</sub> O		1.77	0.14	One	4.6 x 6.3
Yugawaralite	Ca <sub>2</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 8 H <sub>2</sub> O		1.81	0.27	Two	3.6 x 2.8
<b>Group 2 (S6R)</b>						
Erionite <sup>f</sup>	(Ca, Mg, K <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> ) <sub>45</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>27</sub> ] · 27 H <sub>2</sub> O	ε, 23-hedron	1.51	0.35	Three	3.6 x 5.2
Offretite <sup>f</sup>	(K <sub>2</sub> , Ca) <sub>2,7</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>5,4</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12,6</sub> ] · 15 H <sub>2</sub> O	ε, 14-hedron (II)	1.55	0.40	Three	3.6 x 5.2, IIa 6.4, IIc
T	(Na <sub>1,2</sub> , K <sub>2</sub> , 8) [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> ] · 14 H <sub>2</sub> O	ε, 23, 14-hedron	1.50	0.40	Three	3.6 x 4.8
Levynite <sup>m</sup>	Ca <sub>3</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 18 H <sub>2</sub> O	Ellipsoidal 17-hedron	1.54	0.40	Two	3.2 x 5.1
Omega <sup>f</sup>	Na <sub>6A</sub> , TMA <sub>1,6</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>28</sub> ] · 21 H <sub>2</sub> O	14-hedron (III)	1.65	0.38	One	7.5
Sodalite Hydrate	Na <sub>6</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> ] · 7.5 H <sub>2</sub> O	β	1.72	0.35	Three	2.2
Losod	Na <sub>12</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 19 H <sub>2</sub> O	ε, 17-hedron	1.58	0.33	Three	2.2
<b>Group 3 (D4R)<sup>n</sup></b>						
A	Na <sub>12</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 27 H <sub>2</sub> O	α, β	1.27	0.47	Three	4.2
N-A	Na <sub>4</sub> TMA <sub>3</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>17</sub> ] · 21 H <sub>2</sub> O	α, β	1.3	0.5	Three	4.2
ZK-4	Na <sub>8</sub> TMA[(AlO <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>15</sub> ] · 28 H <sub>2</sub> O	α, β	1.3	0.47	Three	4.2
<b>Group 4 (D6R)<sup>n</sup></b>						
Faujasite	(Na <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> , Ca, Mg) <sub>27,5</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>29</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>133</sub> ] · 235 H <sub>2</sub> O	β, 26-hedron (II)	1.27	0.47	Three	7.4
X	Na <sub>66</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>66</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>106</sub> ] · 264 H <sub>2</sub> O	β, 26-hedron (III)	1.31	0.50	Three	7.4
Y	Na <sub>56</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>56</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>136</sub> ] · 250 H <sub>2</sub> O	β, 26-hedron (II)	1.25 - 1.29	0.48	Three	7.4
Chabazite	Ca <sub>2</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> ] · 13 H <sub>2</sub> O	20-hedron	1.45	0.47	Three	3.7 x 4.2
Gmelinite	Na <sub>18</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> ] · 24 H <sub>2</sub> O	14-hedron (II)	1.46	0.44	Three	3.6 x 3.9, IIa 7.0, IIc
ZK-5 <sup>o</sup>	(R, Na <sub>2</sub> ) <sub>15</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>66</sub> ] · 98 H <sub>2</sub> O	α, γ	1.46	0.44	Three	3.9
Lh <sup>h</sup>	K <sub>9</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>27</sub> ] · 22 H <sub>2</sub> O	ε	1.61	0.32	One	7.1
<b>Group 5 (T5O<sub>10</sub>)<sup>i</sup></b>						
Natrolite	Na <sub>16</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>24</sub> ] · 16 H <sub>2</sub> O		1.76	0.23	Two	2.6 x 3.0
Scolecite	Ca <sub>8</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>24</sub> ] · 24 H <sub>2</sub> O		1.75	0.31	Two	2.6 x 3.0
Mesolite	Na <sub>16</sub> Ca <sub>16</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>48</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>72</sub> ] · 64 H <sub>2</sub> O		1.75	0.30	Two	2.6 x 3.0
Thomsonite	Na <sub>4</sub> Ca <sub>3</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>20</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>20</sub> ] · 24 H <sub>2</sub> O		1.76	0.32	Two	2.6 x 3.9
Gonnardite	Na <sub>4</sub> Ca <sub>2</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 14 H <sub>2</sub> O		1.74	0.31	Two	2.6 x 3.9
Edingtonite	H <sub>24</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> ] · 8 H <sub>2</sub> O		1.68	0.36	Two	3.5 x 3.0
<b>Group 6 (T8O<sub>16</sub>)<sup>j</sup></b>						
Mordenite	Na <sub>8</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>40</sub> ] · 24 H <sub>2</sub> O		1.70	0.28	Two	6.7 x 7.0, IIc 2.9 x 5.7, IIb
Dachiardite	Na <sub>5</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>19</sub> ] · 12 H <sub>2</sub> O		1.72	0.32	Two	3.7 x 6.7, IIc 3.6 x 4.9, IIc
Ferrierite	Na <sub>1,5</sub> Mg <sub>2</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>5,5</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>20,5</sub> ] · 18 H <sub>2</sub> O		1.76	0.28	Two	4.3 x 5.5, IIc 3.4 x 4.4, IIb
Epistilbite	Ca <sub>3</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>18</sub> ] · 18 H <sub>2</sub> O		1.76	0.25	Two	3.2 x 5.3, IIc 3.7 x 4.4, IIc
Bikitaite	Li <sub>2</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> ] · 2 H <sub>2</sub> O		2.02	0.23	One	3.2 x 4.0
<b>Group 7 (T<sub>10</sub>O<sub>20</sub>)<sup>k</sup></b>						
Herculandite	Ca <sub>4</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>28</sub> ] · 24 H <sub>2</sub> O		1.69	0.39	Two	4.0 x 5.5, IIc 4.0 x 7.2, IIc
Clinoptilolite	Na <sub>6</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>20</sub> ] · 24 H <sub>2</sub> O		1.71	0.34	?	?
Stilbite	Ca <sub>4</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>28</sub> ] · 28 H <sub>2</sub> O		1.64	0.39	Two	4.1 x 6.2, IIa 2.7 x 5.7, IIc
Brewsterite	(Sr, Ba, Ca) <sub>2</sub> [(AlO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> ] · 10 H <sub>2</sub> O		1.77	0.26	Two	2.7 x 4.1, IIc 2.3 x 5.0, IIa

(จาก Breck , 1974 , Table 2.4 , 2.4a)

(6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ยังไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอน

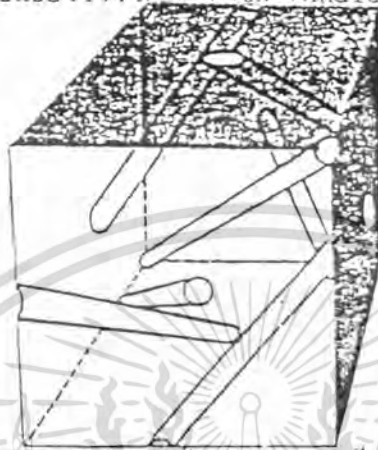
Name	Typical Composition or Unit Cell Contents	Crystal Data <sup>f</sup>	Density g/cc <sup>a</sup>	Void Volume cc/g	Approximate Pore Size, Å <sup>c</sup>
Li-A	$\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ <sup>b</sup>	Orthorhombic	—	0.15	2.6
F	$\text{K}_{11}[(\text{AlO}_2)_{11}(\text{SiO}_2)_{11}] \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$	Tetragonal $a = 10.4, c = 13.9$	2.28	0.16	2.6+
Z	$\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ <sup>b</sup>	—	—	0.14	2.6
H	$\text{K}_{14}[(\text{AlO}_2)_{14}(\text{SiO}_2)_{14}] \cdot 28 \text{H}_2\text{O}$	Hexagonal $a = 13.4, c = 13.2$	2.18	0.22	2.6
Li-H	$\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{20} \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ <sup>b</sup>	Tetragonal	—	0.16	2.6
J	$\text{K}_7[(\text{AlO}_2)_7(\text{SiO}_2)_7] \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Tetragonal $a = 9.45, c = 9.92$	2.22	0.08	2.6
E	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 3.3 \text{H}_2\text{O}$	—	—	0.21	2.6+
M	$\text{K}_{14}[(\text{AlO}_2)_{14}(\text{SiO}_2)_{14}] \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$	Tetragonal $a = 13.1, c = 10.5$	2.37	0.10	2.6
Q	$\text{K}_{20}[(\text{AlO}_2)_{20}(\text{SiO}_2)_{20}] \cdot 86 \text{H}_2\text{O}$	Tetragonal $a = 13.5, c = 35.2$	2.11	0.23	2.6
W	$\text{K}_{42}[(\text{AlO}_2)_{42}(\text{SiO}_2)_{76}] \cdot 107 \text{H}_2\text{O}$	Cubic, $a = 20.1$	2.18	0.22	2.6
N <sup>d</sup>	$(\text{Na}, \text{TMA})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.8-2.2 \text{SiO}_2 \cdot \text{Y} \text{H}_2\text{O}$	Cubic, 37.2	—	0.16	2.6
ZSM-2	$\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3.3-4.0 \text{SiO}_2 \cdot \text{Y} \text{H}_2\text{O}$	Tetragonal, $a = 27.4, c = 25.1$	—	0.22	6+
ZSM-3	$(\text{Na}, \text{Li})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2.8-4.5 \text{SiO}_2 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$	Hexagonal, $a = 17.5$	—	0.30	6+
ZSM-4	$(\text{TMA}, \text{Na})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6-15 \text{SiO}_2 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	Cubic, $a = 22.2$	—	0.14	6+
ZSM-5 <sup>e</sup>	$(\text{TPA}, \text{Na})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5-100 \text{SiO}_2 \cdot \text{Y} \text{H}_2\text{O}$	Tetragonal $a = 23.2, c = 19.9$	—	0.10	6
ZSM-10 <sup>f</sup>	$(\text{R}, \text{K})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5-7 \text{SiO}_2 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$	—	—	0.14	6+
BETA <sup>h</sup>	$(\text{TEA}, \text{Na})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5-100 \text{SiO}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Cubic, $a = 12.04$	—	0.20	6+
Z-21	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.7-2.1 \text{SiO}_2 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$	Cubic, $a = 56.7$	—	0.14	2.6

(จาก Breck, 1974, Table 2.4, 2.4b)

## ช่องว่างภายในโครงสร้างซีโอไลต์

ธรรมชาติของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันในซีโอไลต์ที่ถูกทาการเสียน้ำออกหมดแล้วจะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ ระบบช่องว่างในโครงสร้างมีอยู่ 3 ระบบ คือ

1. ระบบช่องว่างใน 1 มิติ (one-dimensional system) ซึ่งช่องว่างหรือโพรงนี้จะไม่ติดกันเลย เช่นช่องว่างในอะแล็กซิม (analcime) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโพรงในโครงสร้างของอะแล็กซิมซึ่งไม่ติดกันเลย (จาก Breck, 1974, Fig. 2.26)

2. ระบบช่องว่างใน 2 มิติ (two-dimensional system) จะพบช่องว่างแบบนี้ในซีโอไลต์ กลุ่ม 5, 6 และ 7 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 (a) แสดงช่องว่างใน 2 มิติในฮอร์เดนไนท์ โดยมีโพรงหลักอยู่ในระนาบ c และเชื่อมกันด้วยโพรงเล็ก ๆ ในแนวระนาบ a

(b) แสดงช่องว่างใน 2 มิติในซีโอไลต์กลุ่ม 5 เช่นนาโทรไลท์

(จาก Breck, 1974, Fig 2.27)

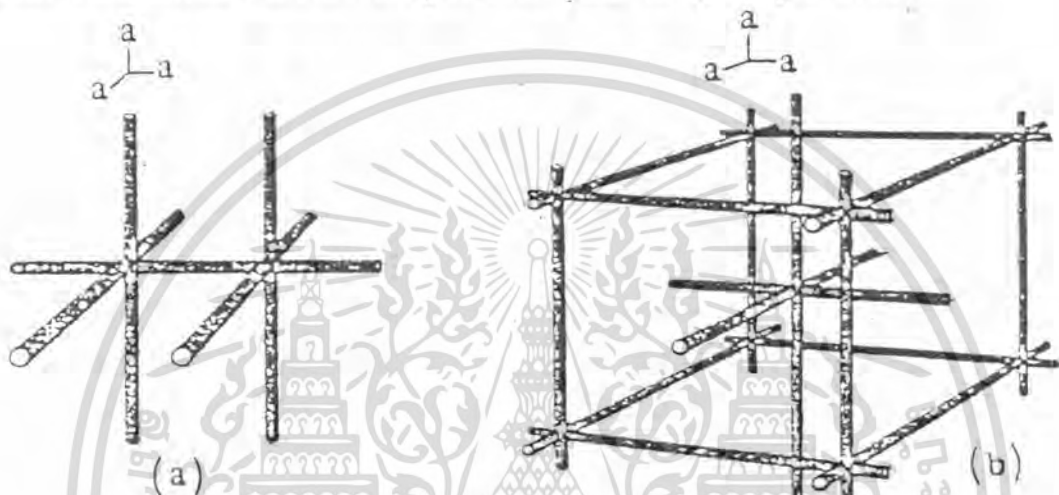
(8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระบบช่องว่างใน 3 มิติ (three-dimensional system) ระบบนี้จะมีการตัดกันของโพรงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

3.1 มีช่องว่างเท่ากันในทุกทิศทาง (equidimensionals) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงทุกโพรงเท่ากันหมด โดยไม่คำนึงถึงทิศทาง เช่น ซีโอไลต์เอ (รูปที่ 2.6a) แฉิซ์เค-5 (รูปที่ 2.6b) คาบาไซด์ (chabazite) (รูปที่ 2.7a) และ เอรีวไนท์ (รูปที่ 2.7c)

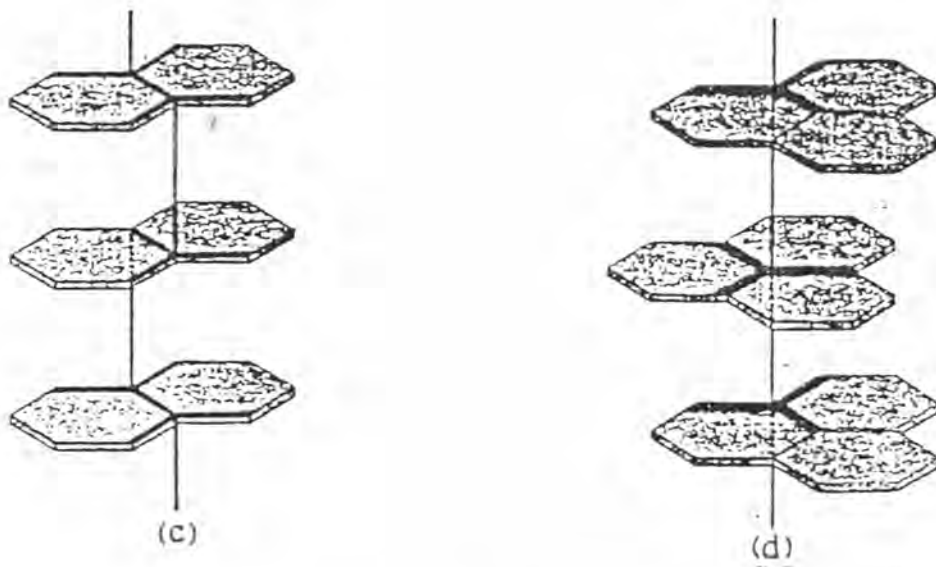
3.2 มีการตัดกันของโพรงแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงไม่เท่ากันขึ้นกับทิศทาง การเกิดผลึกเช่น gmelinite (รูปที่ 2.7c) และ เลวีไนท์ (รูปที่ 2.7d)



รูปที่ 2.6 (a) แสดงระบบช่องว่างใน 3 มิติของซีโอไลต์เอ  
 (b) แสดงช่องว่างใน 3 มิติ สองระบบที่ไม่ขึ้นต่อกันมีขนาดเท่ากันแต่ไม่ตัดกัน  
 (จาก Breck , 1974 , Fig 2.28)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 (a) คาบาไซด์ (chabazite)

(b) เกลินท์ (gmelinite)

(c) เอร์ริโอนท์ (erionite)

(d) เลวินท์ (levynite)

(จาก Breck , 1974 , Fig. 2.29)

**ความหนาแน่นของโครงร่างผลึกของซีโอไลต์**

ลักษณะของน้ำในผลึกของซีโอไลต์จะแปรผันได้มากมายตั้งแต่สภาพที่สามารถอธิบายได้ง่ายที่สุดคือโมเลกุลเดี่ยว ๆ จนกระทั่งอยู่ในสภาพเป็นกระจุกหรือจับตัวกับไอออนบวกและออกซิเจนในโครงสร้างผลึก โดยขึ้นอยู่กับขนาดของที่ว่างภายในโพรงที่มีอยู่

ปริมาณในโครงร่างผลึกจะถูกทำให้เต็มด้วยน้ำมากถึง 50 % ของปริมาณผลึกทั้งหมด เมื่อทำการไล่น้ำออกจากผลึกของซีโอไลต์ก็จะได้ช่องว่างซึ่งสามารถบรรจุโมเลกุลสารชนิดอื่นเข้าไปได้ ปริมาตรช่องว่างในโครงร่างผลึกสามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่อยู่เต็มในโครงสร้าง ความหนาแน่นโดยมากมักขึ้นกับปริมาณทรงสี่หน้าในผลึกดังนั้นปริมาณของน้ำที่ใช้ อาจจะได้ ความหนาแน่นของโครงสร้างผลึก (framework density, df) ในหน่วย g/cc. หาได้ดังสมการ

$$df = \frac{1.66 [M]}{V} = \frac{1.66 [59x+60y]}{V}$$

(10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $M$  เป็นน้ำหนักของโครงร่างผลึก

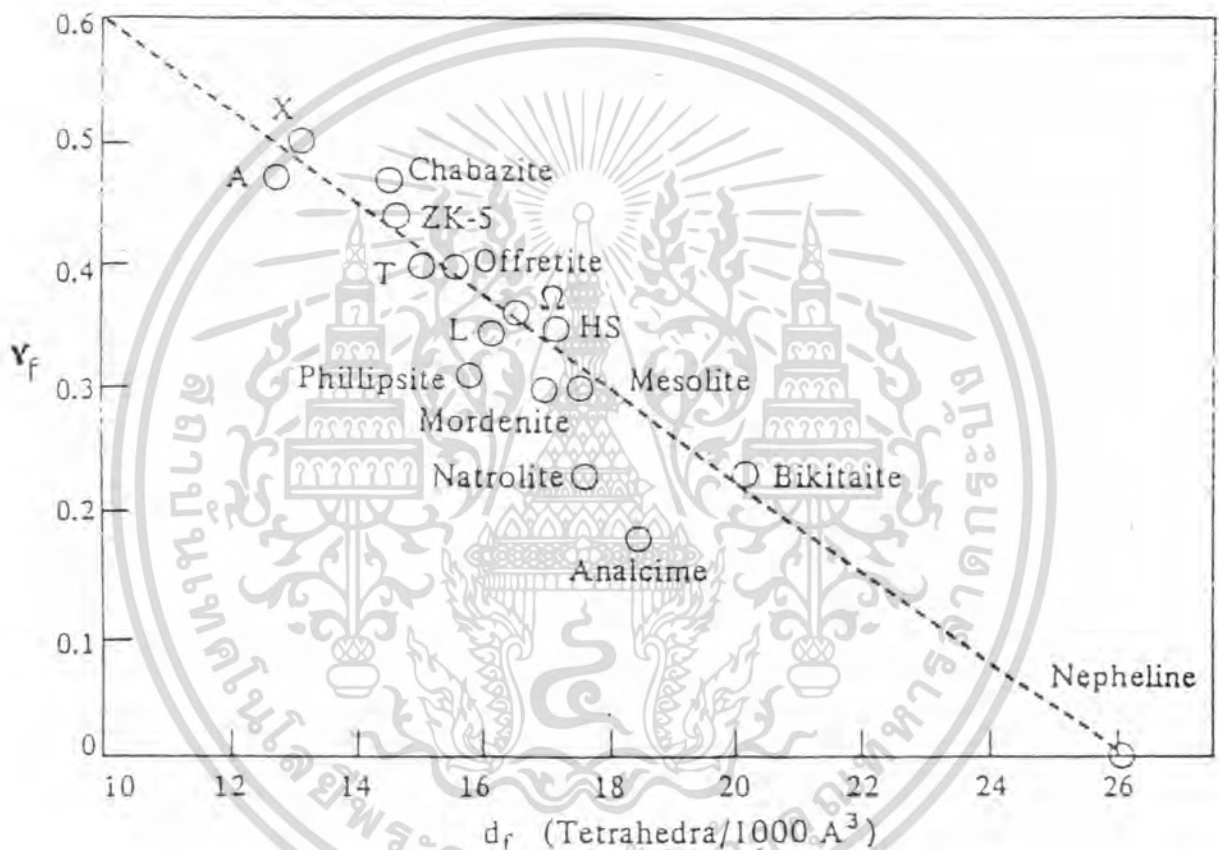
$x$  และ  $y$  เป็นจำนวนของ  $AlO_2$  และ  $SiO_2$  ในหนึ่งหน่วยเซลล์ตามลำดับ

$V$  เป็นปริมาตรของหน่วยเซลล์มีหน่วยเป็น  $\text{\AA}^3$

ความหนาแน่นที่หาได้มีค่าเกือบสับสนของจำนวนหน่วยรูปทรงสี่หน้าต่อ  $1000 \text{\AA}^3$

นอกจากนี้ความหนาแน่นยังขึ้นกับเศษส่วนของช่องว่าง (void fraction,  $v_f$ ) อีกด้วย

ดังรูปที่ 2.8



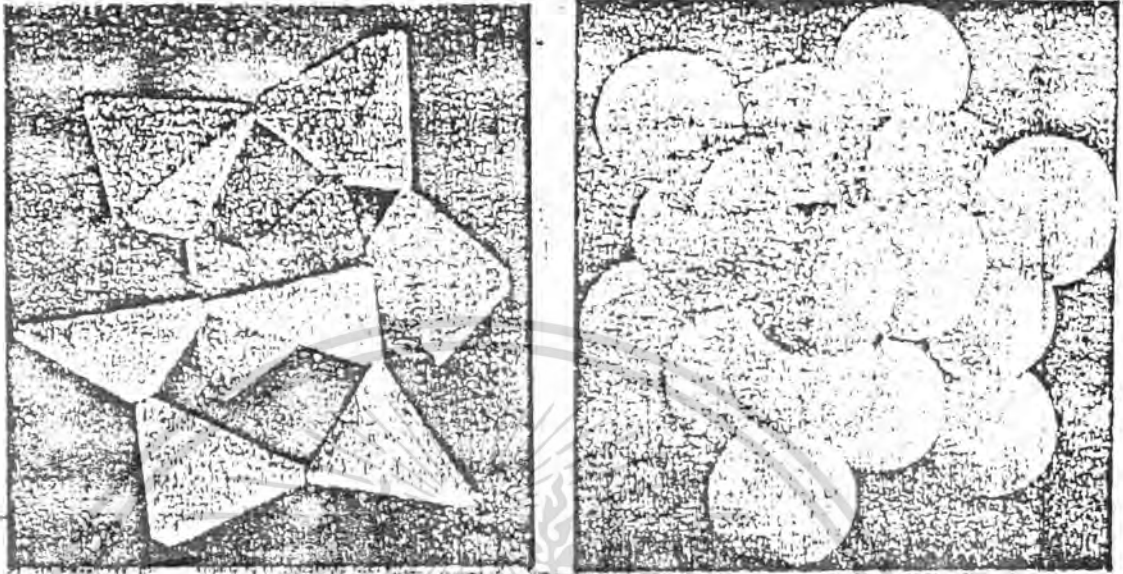
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง กับ ความหนาแน่น  $v_f$  หน่วยเป็นจำนวนรูปทรงสี่หน้าต่อ  $1000 \text{\AA}^3$

(จาก Breck , 1974 , Fig 5.45)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Breck ได้ทำการจัดให้ซีโอไลต์เออยู่ในกลุ่มที่ 3 ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็น D4R ดัง

รูปที่ 2.9

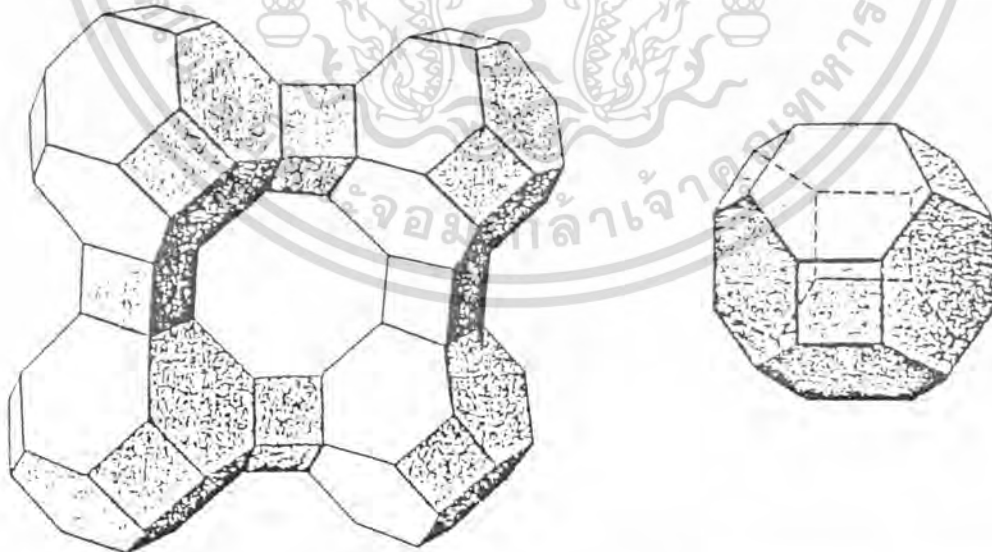


รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างที่เป็น D4R ของซีโอไลต์เอ

(จาก J. Am. Chem. Soc. 78 (1956) : 5973.)

ซีโอไลต์เอประกอบด้วยรูปทรงหลายเหลี่ยม 2 ชนิดก็คือ

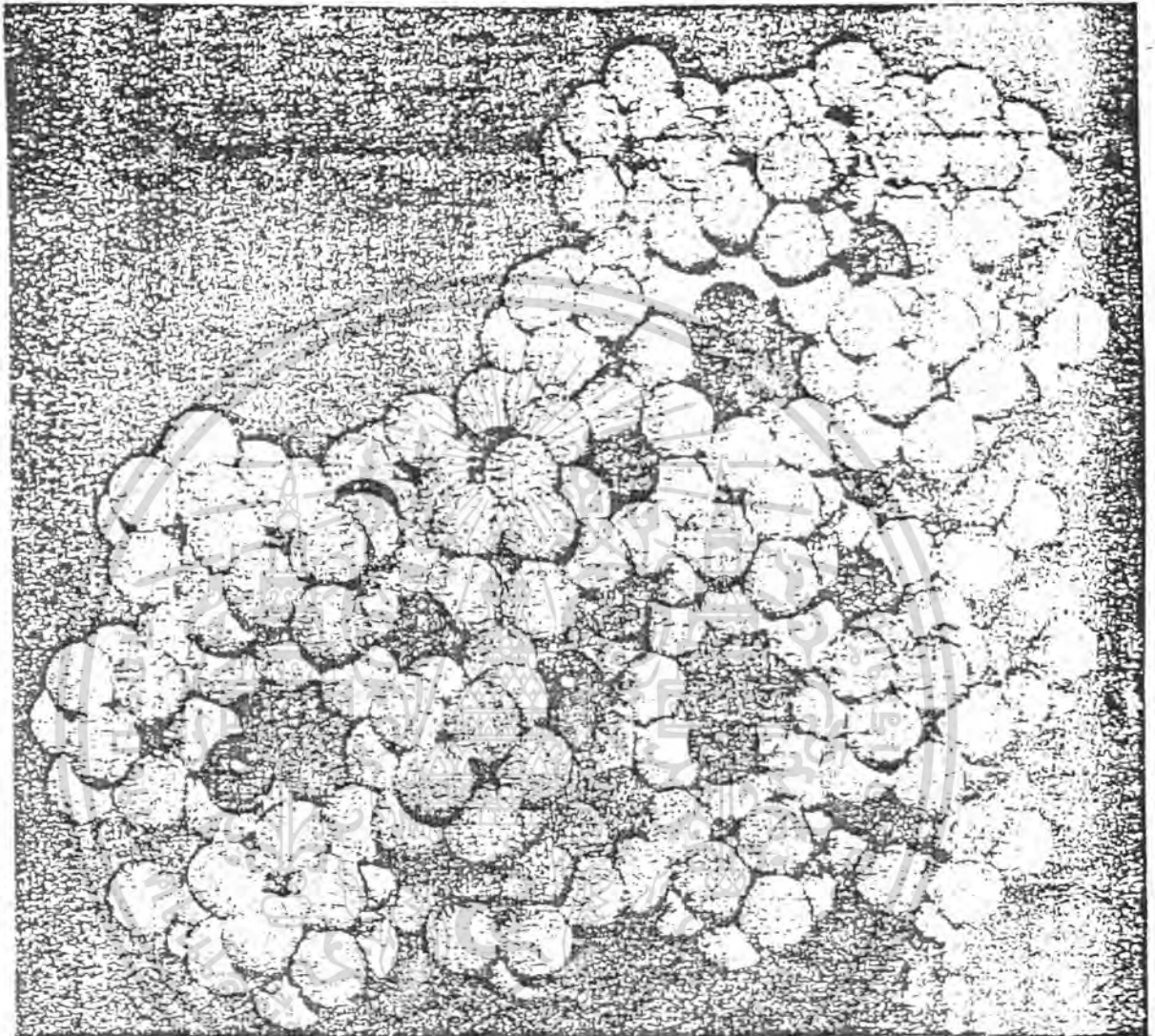
1. การจับตัวเป็นรูปลูกบาศก์โดย 2 รูปของทรงสี่หน้าหรือ D4R
2. จับตัวกันด้วย 24 รูปของทรงสี่หน้าเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้าหรือทรงเบต้า ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการจับตัวเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้า (truncated octahedron)

านซีโอไลต์เอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ (จาก Breck ค.ศ. 1974 หน้า Fig. 2.33) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แบบจำลอง space-filling แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์เอ

(จาก Breck ,1974, Fig 2.36)

บทเต็แล้วซีโอไลต์เอประกอบด้วย 24 รูปของทรงสี่หน้าเป็น 12 รูปของ  $AlO_4$  และ 12รูปของ  $SiO_4$  มีน้ำบรรจุอยู่ 27 โมเลกุล โดยมีการสลับกันไปของ  $AlO_4$  และ  $SiO_4$  ในโมเลกุลเพราะ Si/Al เป็น 1: 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่(13)ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของซีโอไลต์เอ

Structure Group:	3	
Reference:	102, 103, 105–112, 115, 172	
<b>Chemical Composition</b>		
Typical Oxide Formula:	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 4.5 \text{H}_2\text{O}$	
Typical Unit Cell Contents:	$\text{Na}_{12} [(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 27 \text{H}_2\text{O}$ , pseudo cell and 8X for true cell	
Variations:	$\text{Si}/\text{Al} = \sim 0.7$ to 1.2; occlusion of $\text{NaAlO}_2$ in $\beta$ -cages	
<b>Crystallographic Data</b>		
Symmetry:	Cubic	Density: 1.99 g/cc
Space Group:	$\text{Pm}\bar{3}\text{m}$ ( $\text{Fm}\bar{3}\text{c}$ for true cell)	Unit Cell Volume: $1870 \text{ \AA}^3$ pseudo cell
Unit Cell Constants:	$a = 12.32 \text{ \AA}$ , pseudo cell $a = 24.64 \text{ \AA}$ for true cell	X-Ray Powder Data: Table 4.26
<b>Structural Properties</b>		
Framework:	Stereo 2.16	Cubic array of $\beta$ -cages linked by D4R units
SBU:	D4R	Void volume: 0.47 cc/cc
Cage type:	$\alpha, \beta$ (one each)	Framework density: 1.27 g/cc
Channel System:	Fig. 2.28a	Three-dimensional, $\parallel$ to $[100]$ ; 4.2 $\text{\AA}$ and $\parallel$ to $[111]$ ; 2.2 $\text{\AA}$ minimum diameter
<b>Hydrated—</b>		
Free Apertures:		2.2 $\text{\AA}$ into $\beta$ -cage and 4.2 $\text{\AA}$ into $\alpha$ -cage
Cation Locations:		8 $\text{S}_I$ on 6-rings, 4 cations with $\text{H}_2\text{O}$ in the 8-rings
<b>Dehydrated—</b>		
Free Apertures:		4.2 $\text{\AA}$
Cation Locations:		8 $\text{S}_I$ in 6-rings, 3 $\text{S}_{II}$ in 8-rings, 1 $\text{S}_{III}$ at the 4-ring
Effect of Dehydration:		None on framework, 4 cations move to $\text{S}_{II}$
Location of $\text{H}_2\text{O}$ Molecules:		Dodecahedral arrangement in $\alpha$ -cage 4 molecules in $\beta$ -cage.
Largest Molecule Adsorbed:		$\text{C}_2\text{H}_4$ at RT, $\text{O}_2$ at $-183^\circ\text{C}$
Kinetic Diameter, $\sigma$ , $\text{\AA}$ :		3.9 and 3.6

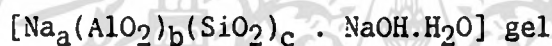
(จาก Breck , 1974 , Table 2.18)

ซีโอไลต์ถูกเตรียมได้ภายใต้ภาวะไฮดรותרมัล โดยการตกผลึกซีโอไลต์จากระบบที่เป็นสารละลายของน้ำ ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสม โดยมีภาวะทั่วไปของการสังเคราะห์ดังนี้

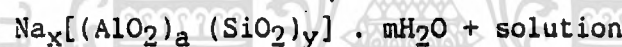
1. มีสารตั้งต้นที่ว่องไว
  2. อยู่ในสภาวะที่มีค่า pH สูง เช่นในโซเดียมไฮดรอกไซด์
  3. อุณหภูมิและความดันในปฏิกิริยาต่ำ
  4. ส่วนประกอบของเจลมีความเข้มข้นอิ่มตัวอย่างยิ่งขาดเพื่อทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย
- เจลในที่นี้คือสารประกอบโลหะของอลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีน้ำอยู่มากซึ่งเตรียมจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย สารตั้งต้นที่ว่องไว ของแข็งส่วนที่แขวนลอยหรือสารอลูมิเนียมซิลิเกตที่ว่องไว เช่น เมตาเคอลิน เราอาจเขียนสมการที่เกิดผลึกซีโอไลต์ได้ดังนี้



$T_1 = 25^\circ \text{C}$



$T_2 = 25 - 175^\circ \text{C}$



Zeolite crystals

เราอาจเตรียมเจลจากสารตั้งต้นที่ละลายน้ำ เช่น  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_2$  และ  $\text{NaOH}$  ซึ่งจะใช้ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในการเตรียมเจลที่จะเป็นซีโอไลต์ต่างชนิดกัน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงซีโอไลต์สังเคราะห์

Zeolite Type	Typical Reactant Comp. (moles/ $Al_2O_3$ )			Reactants	Typical Conditions Temp. ( $^{\circ}C$ )	Zeolite Comp. (moles/ $Al_2O_3$ )			Properties	X-Ray Table	Ref.	Other Names Ref.
	$Na_2O$	$SiO_2$	$H_2O$			$Na_2O$	$SiO_2$	$H_2O$				
A	2	2	35	NaAlO <sub>2</sub> sodium silicate NaOH colloidal SiO <sub>2</sub>	20 - 175	1	2	4.5	cubic, 1 - 2 $\mu$ , n = 1.46, d = 1.99	4.27	4,48	Q, 47, 53, 54
P <sub>c</sub>	2	3.8	94	NaAlO <sub>2</sub> sodium silicate, NaOH colloidal SiO <sub>2</sub>	60 - 150	1	2 - 5	5	irregular, n = 1.476, d = 2.01	4.74	47	53, 55
P <sub>l</sub>	6	8	a	NaAlO <sub>2</sub> sodium silicate NaOH colloidal SiO <sub>2</sub>	60 - 250	1	3.2 - 5.3	~5	gismondine-type 2 $\mu$ , n = 1.482, d = 2.15	4.75	47	52
R	3.2	4	260	NaAlO <sub>2</sub> sodium silicate, NaOH colloidal SiO <sub>2</sub>	100	1	3.5	5.7	irregular 0.6 - 7 $\mu$ d = 1.98	4.80	50	-
S	2.4	6	80	NaAlO <sub>2</sub> sodium silicate NaOH colloidal SiO <sub>2</sub>	80 - 120	1	4.6 - 5.9	6	chabazite-type spherulites, n = 1.458	4.83	49	NaS, 47
X	3.6	3	144	NaAlO <sub>2</sub> sodium silicate NaOH colloidal SiO <sub>2</sub>	20 - 120	1	2.0 - 3.0	6	octahedra, d = 1.94 n = 1.45 - 1.46	4.88	5, 11	R, 47
Y	8	20	320	NaAlO <sub>2</sub> sodium silicate NaOH	20 - 175	1	>3.0 - 6.0	9	faujasite-type octahedra, d = 1.92 n = 1.45	4.90	11, 61	
"Ferrierite" I	10	b	b	Silica Gel	150	1	10	7	rectangular, 0.1 $\mu$ m n = 1.469	4.45	39	Z, 8,
HS	2.8	3.0	34	Silica Gel	100	1.16	2.1	2.8	-	-	-	Hydro sodali 54
	4	2	xs	Silica Gel	100	2.0	2.1	2.5	spherulitic, n = 1.468 - 1.493	4.53	35, 4	basic sodali specie
Zh	~7	~2	150	sodium silicate NaAlO <sub>2</sub>	90	1	2.1	2.7	irregular, n = 1.49	-	56, 57	G
A (2.5)	7.5-17.8	5-15	165-330	sodium silicate sodium aluminate	92 - 100 1 hr	1	2.5	6	adsorbs n- hexane	-	58	
Z-21	7	0.3	117	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * 3 H <sub>2</sub> O	100	1	2	~2	cubic, a = 36.7	4.93	59	
	30	2.0	504	NaOH	1 hr							
	43	6.0	720	sodium silicate								
Basic Cancrinite	3	2	xs		390	1	2.4 (0.6 NaOH)		hexagonal up to 500 $\mu$ m n = 1.50		35	

(จาก Breck , 1974 , table 4.6)

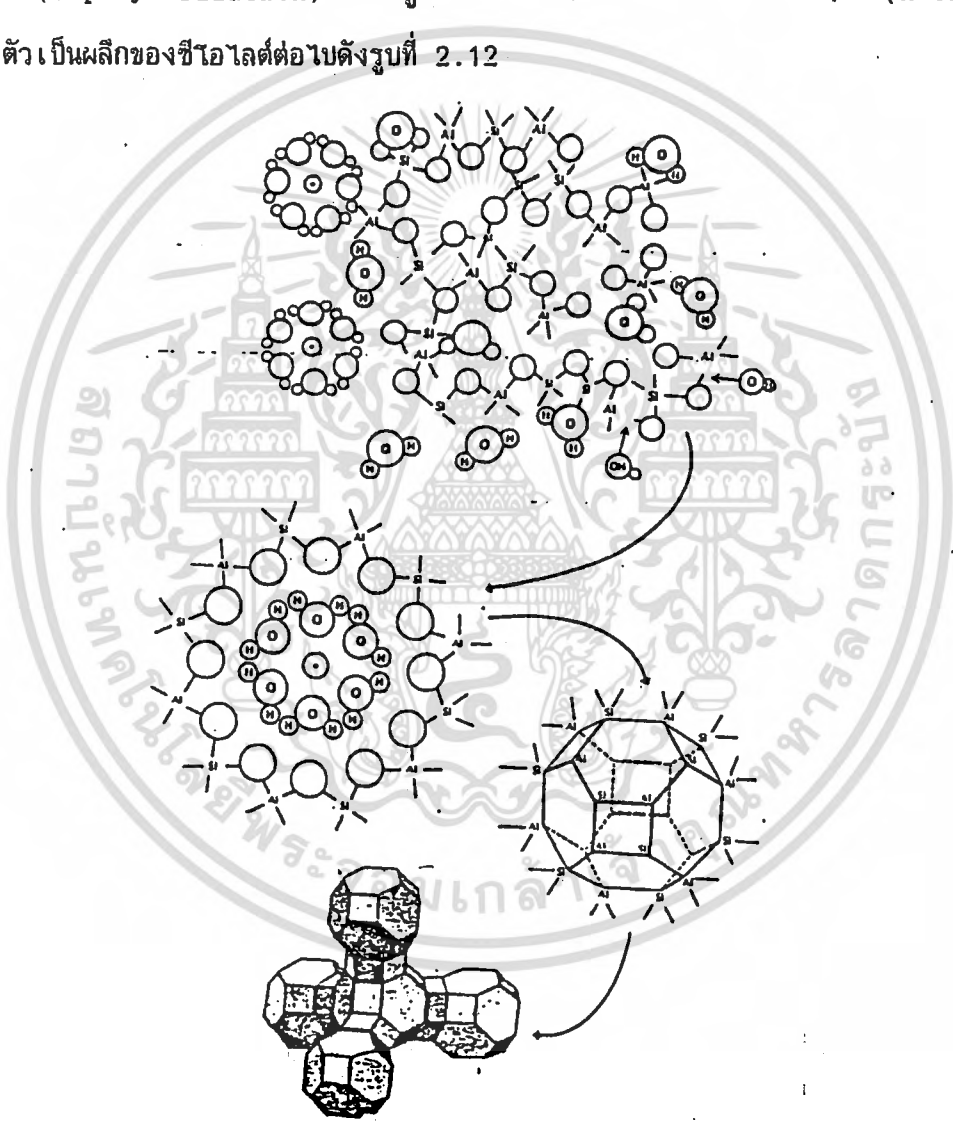
(16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ นั้นจะถูกกำหนดระยะเวลาในการเตรียมในสารละลาย NaOH เพราะถ้าทิ้งไว้จะทำให้ซีโอไลต์เอเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์พีที่เสถียรกว่า เช่น ซีโอไลต์เอจะเสถียรในสารละลาย 1 โมล NaOH เป็นเวลา 2 วัน และจะเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์พีใน เวลา 6-10 วัน ถ้าแช่ซีโอไลต์เอในสารละลาย NaOH ที่เข้มข้นมาก เช่น 10 % NaOH ซีโอไลต์เอจะเปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกซีโซดาไลต์

กลไกการเกิดเป็นซีโอไลต์ จะเกิดการพอลิเมอร์เซชันร่วม (copolymerization) ของพวกซิลิเกตและอลูมิเนตซึ่งอยู่ในสภาพของเจล จากนั้นเจลเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ด้วยหมู่ไฮดรอกซีของน้ำ และเกิดเป็นนิวคลีไอ (nuclei) เพื่อก่อตัวเป็นผลึกของซีโอไลต์ต่อไปดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการเกิดผลึกซีโอไลต์ โดยการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันของเจลด้วยไฮดรอกซีไอออน จากนั้นรูปทรงสี่หน้าจะจับตัวกันใหม่เกิดเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมขึ้น

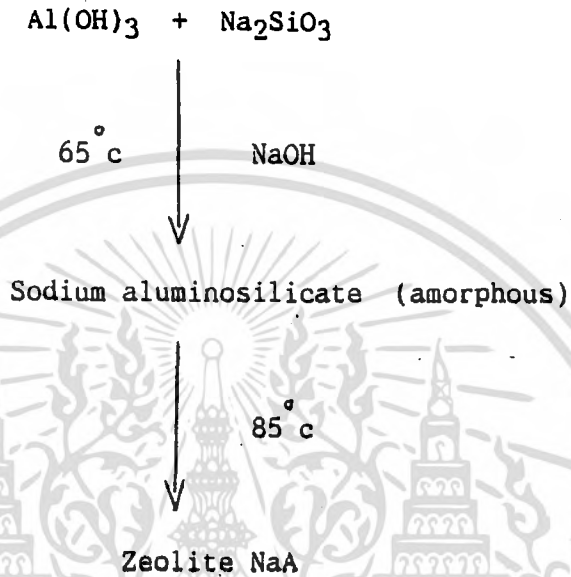
(จาก Breck , 1974 , Fig 4.23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ (17) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

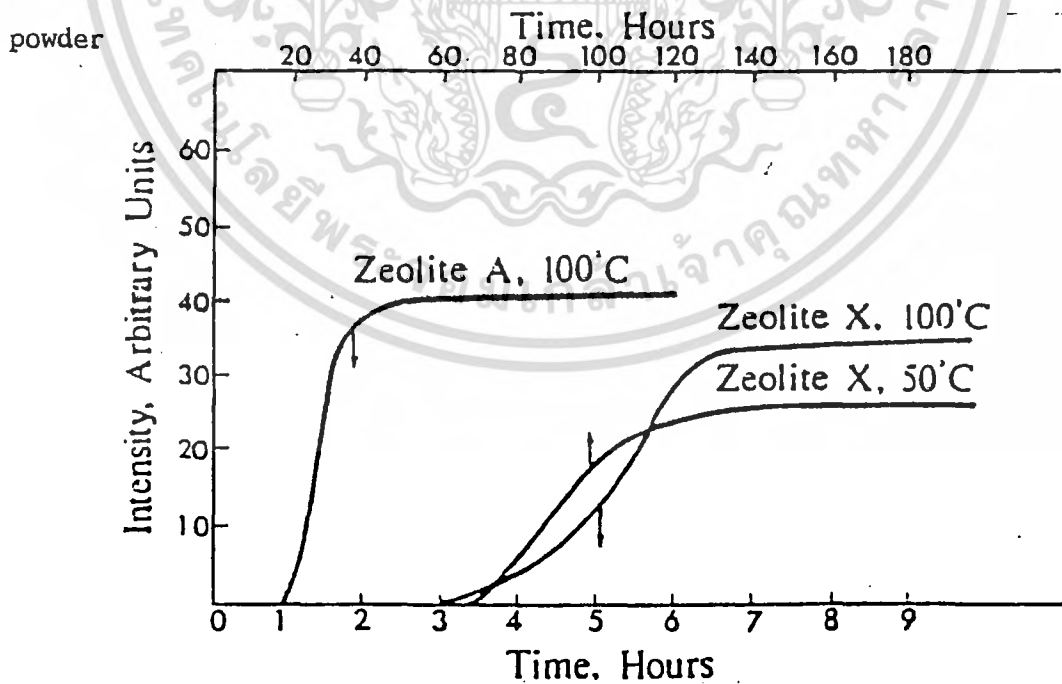
กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่นิยมมาใช้ส่วนใหญ่เป็นแบบไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal)

ที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ

1. Hydrogel process (Precipitation Process) เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ให้ผลผลิตที่มีความบริสุทธิ์สูง ในระยะเวลาที่กำหนดไว้ โดยอาจเขียนขั้นตอนการสังเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 แสดงระยะเวลาการเกิดผลึกซีโอไลต์เอและเอ็กซ์ วัดโดยวิธี x-ray

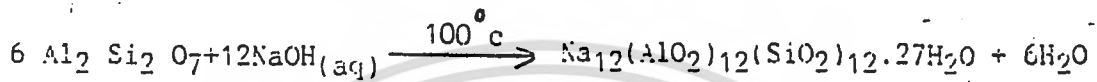
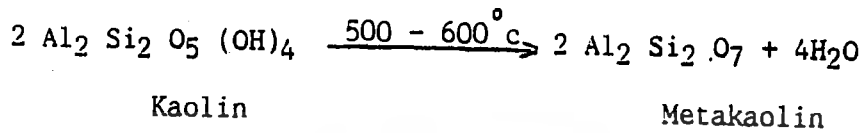


(จาก Breck , 1974 , Fig 4.7)

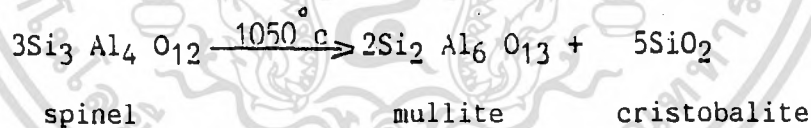
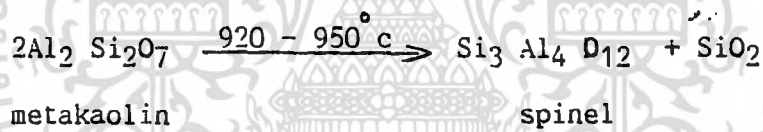
(18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Clay conversion (digestion process) เป็นกระบวนการแปรสภาพดิน  
 โดยการเผา (calcination) และนำมาทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการเตรียม  
 ซีเมนต์เอินั้นจะใช้ดินขาวหรือเคลลิน (Kaolin) นำมาเผาที่อุณหภูมิ 500-600 °c ขึ้น  
 ตอนการเตรียมมีดังนี้



แต่ถ้าทำการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเมตาเคลลินถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นสปินเนล (spinel)  
 มุลไลต์ และ คริสโตบาลิตตามลำดับดังสมการ



ตารางที่ 2.6 แสดงซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเมตาเคลินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

Zeolite	Reactant Composition (moles/ $Al_2O_3$ )			Reactants	Typical Conditions Temp. ( $^{\circ}C$ )	Zeolite Composition (moles/ $Al_2O_3$ )			Ref.
	$Na_2O$	$SiO_2$	$H_2O$			$Na_2O$	$SiO_2$	$H_2O$	
A	2.4	2	96	Metakaolin, NaOH	80-85, aged at RT 16 hr, 8 hr; or RT, 35 days	Same as A			111
P	4	10	120	Metakaolin, NaOH, sodium silicate	100, aged at RT 3 days with stirring, 3 days	Same as P			31
X	4	4	160	Metakaolin, sodium silicate, NaOH	100, aged at RT 3 days, 1 day	1.0	2.5		112
Y	3.5	7	140	Metakaolin, NaOH, sodium silicate, NaCl ( $NaCl/Al_2O_3=2$ )	100, aged at RT 24 hr, 24 hr	1.0	3.5		112
Y	5	10	200	Calcined, acid-leached metakaolin, NaOH	100, aged at RT 24 hr, 3 days	1.0	4.1		118
S	4.4	11	264	Calcined, acid-leached metakaolin, sodium aluminate, $SiO_2/Al_2O_3$ of leached metakaolin = 143	100, aged at RT 24 hr, 1-14 days	0.8	5.1	7.2	31
L K <sub>2</sub> O	2.2	2.2	11	176 Calcined, acid-leached metakaolin, NaOH, KOH	100, aged at RT, 24 hr, 4 days	0.9 K <sub>2</sub> O	5.7	4.7	118

(จาก Breck, 1974, Table 4.18a)

### สมบัติของซีโอไลต์

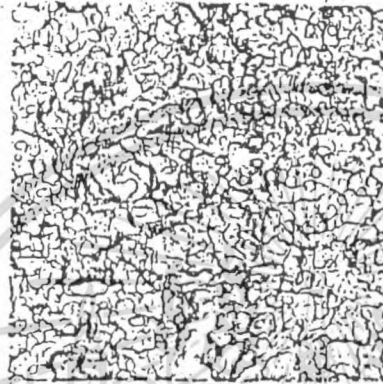
(1) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ที่สำคัญได้แก่

1.1) รูปร่าง (morphology) ผลึกของซีโอไลต์สังเคราะห์จะมีรูปแบบเฉพาะ ผลึกของซีโอไลต์เอโดยปกติมีรูปร่างเป็นรูปลูกบาศก์แบบ penetration twins หรือเรียกอีกอย่างได้ว่าแบบฟลูออสปาร์ทวิน (Fluorspar twin)

รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดผลึกซีอาไลต์เอทีเวลาต่าง ๆ กัน



เพลตที่ 1 เริ่มเกิดเจล



เพลตที่ 2 : 100°C, 1 ชั่วโมง



เพลตที่ 3 : 100°C, 1.25 ชั่วโมง



เพลตที่ 4 : 100°C, 1.5 ชั่วโมง



เพลตที่ 5 : 100°C, 1.5 ชั่วโมง  
เริ่มเกิดผลึก



เพลตที่ 6 : 100°C, 2 ชั่วโมง  
ผลึกมีขนาดใหญ่มากขึ้น



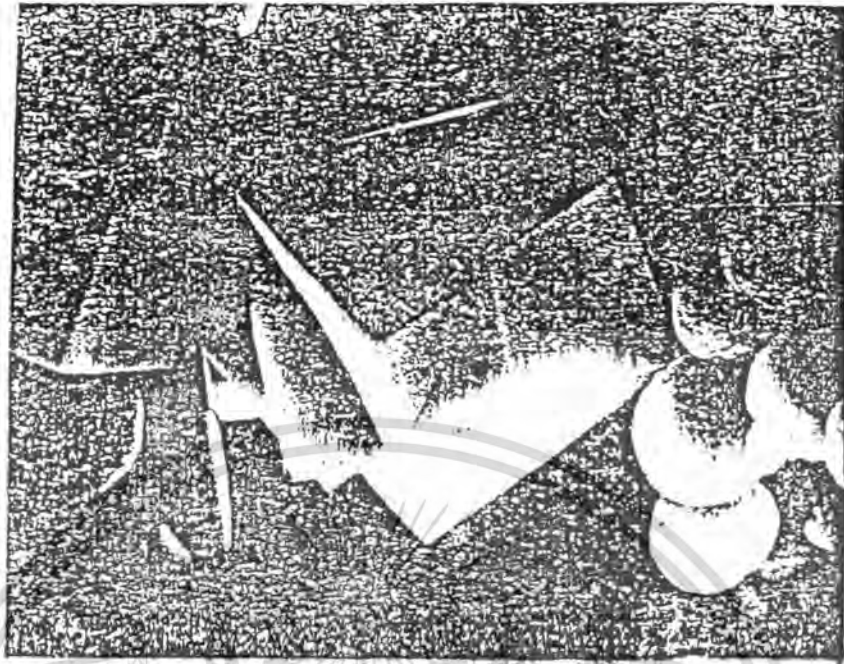
เพลตที่ 7 : ผลึกมีขนาด 30 ไมครอน



เพลตที่ 8 : ผลึกมีความหนา 50  
อังสตรอม

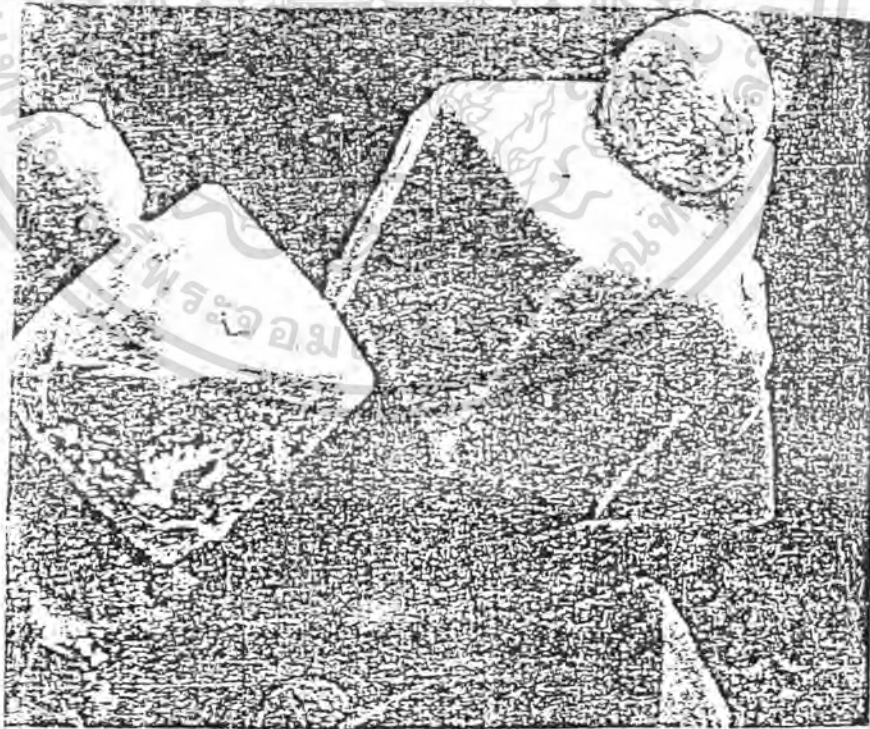
(จาก Breck , 1974 , Fig 4.24)

รูปที่ 2.15 แสดงรูปทรงผลึกแบบ penetration twinning ของซีโอไลต์เอ ขยาย 20,000 เท่า



(จาก Breck , 1974 , Fig. 5.3)

รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะผลึกของซีโอไลต์เอ็กซ์ เป็นแบบ spinel-type เป็นแบบ spinel และทรงกลมเป็นซีโอไลต์บี ขยาย 13,800 เท่า

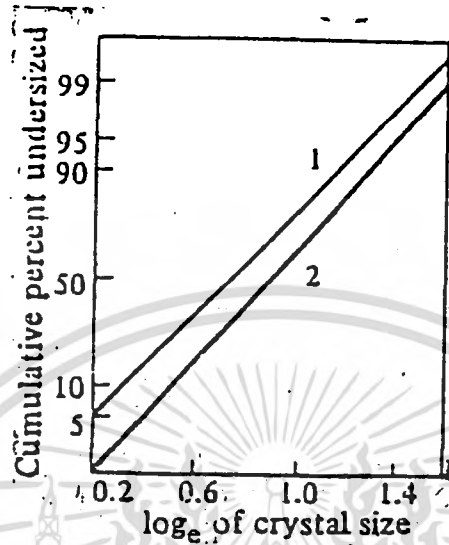


(จาก Breck , 1974 , Fig - 5.5)

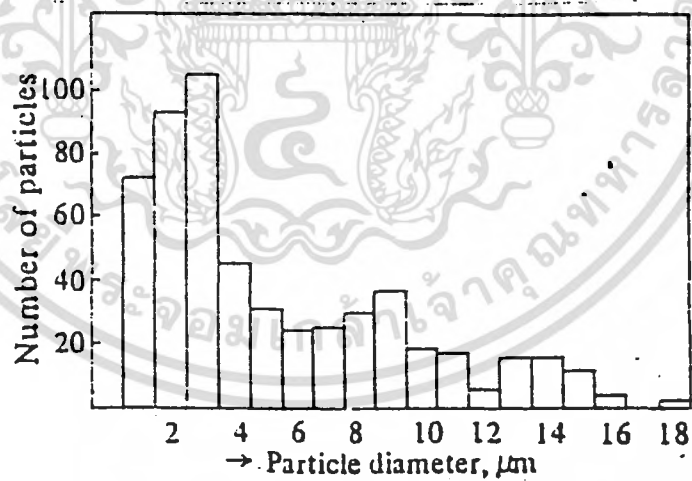
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2) ขนาดของอนุภาคของซีโอไลต์เอ (particle size of synthetic Zeolite A)

จากการวัดด้วย x-rays พบว่าซีโอไลต์เอมีการกระจายอนุภาคอยู่ในช่วง 1-10 ไมครอน ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงค่าการกระจายของขนาดของซีโอไลต์เอ (จาก Breck , 1974 , Fig . 5.10)



รูปที่ 2.18 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์เอ (จาก Breck , 1974 , Fig . 5.11)

1.3) ความหนาแน่น (Density) ซีโอไลต์จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.9-2.3 กรัมต่อมิลลิกรัม โดยความหนาแน่นของซีโอไลต์จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของไอออนของโลหะและปริมาณของรูพรุน ดังตารางที่ 2.7

Unit Cell	Density (g/cc)	$a_0$ (Å)	$V_p'$ (Å <sup>3</sup> /uc)
$\text{Li}_8\text{Na}_4(\text{A}) \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$	1.91	12.04	735
$\text{Na}_{12}(\text{A}) \cdot 27 \text{H}_2\text{O}$	1.99	12.32	833
$\text{Ag}_{12}(\text{A}) \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$	2.76	12.38	733
$\text{Tl}_{9.6}\text{Na}_{2.4}(\text{A}) \cdot 20 \text{H}_2\text{O}$	3.36	12.38	584
$\text{Ca}_6(\text{A}) \cdot 30 \text{H}_2\text{O}$	2.05	12.26	883

ตารางที่ 2.7 ผลของไอออนบวกที่มีต่อปริมาณรูพรุนในซีโอไลต์เอ (จาก Breck, 1974, Table 5.8)

#### 1.4) การสั่น (vibration) ของโครงสร้าง

ศึกษาโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy) ที่ไอไลต์แต่ละชนิดจะมีการสั่นไม่เหมือนกันขึ้นกับโครงสร้างผลึก โดยทั่วไปอาจแบ่งสัญญาณอินฟราเรดออกได้ สองชนิดคือ

1) สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการสั่นภายใน (internal vibration) ของรูปสี่หน้า (tetrahedron) ของ  $\text{TO}_4$  ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐาน สัญญาณนี้จะแบ่งออกเป็นสัญญาณที่เกิดจากโครงสร้างอื่นเลย และสัญญาณนี้จะเกิดขึ้นกับซีโอไลต์ทุกชนิด

2) การสั่นที่จุดเชื่อมต่อระหว่างรูปสี่หน้า (external vibration) สัญญาณนี้จะแตกต่างกันไปในซีโอไลต์แต่ละตัวตามลักษณะของโครงสร้างที่ต่างกัน

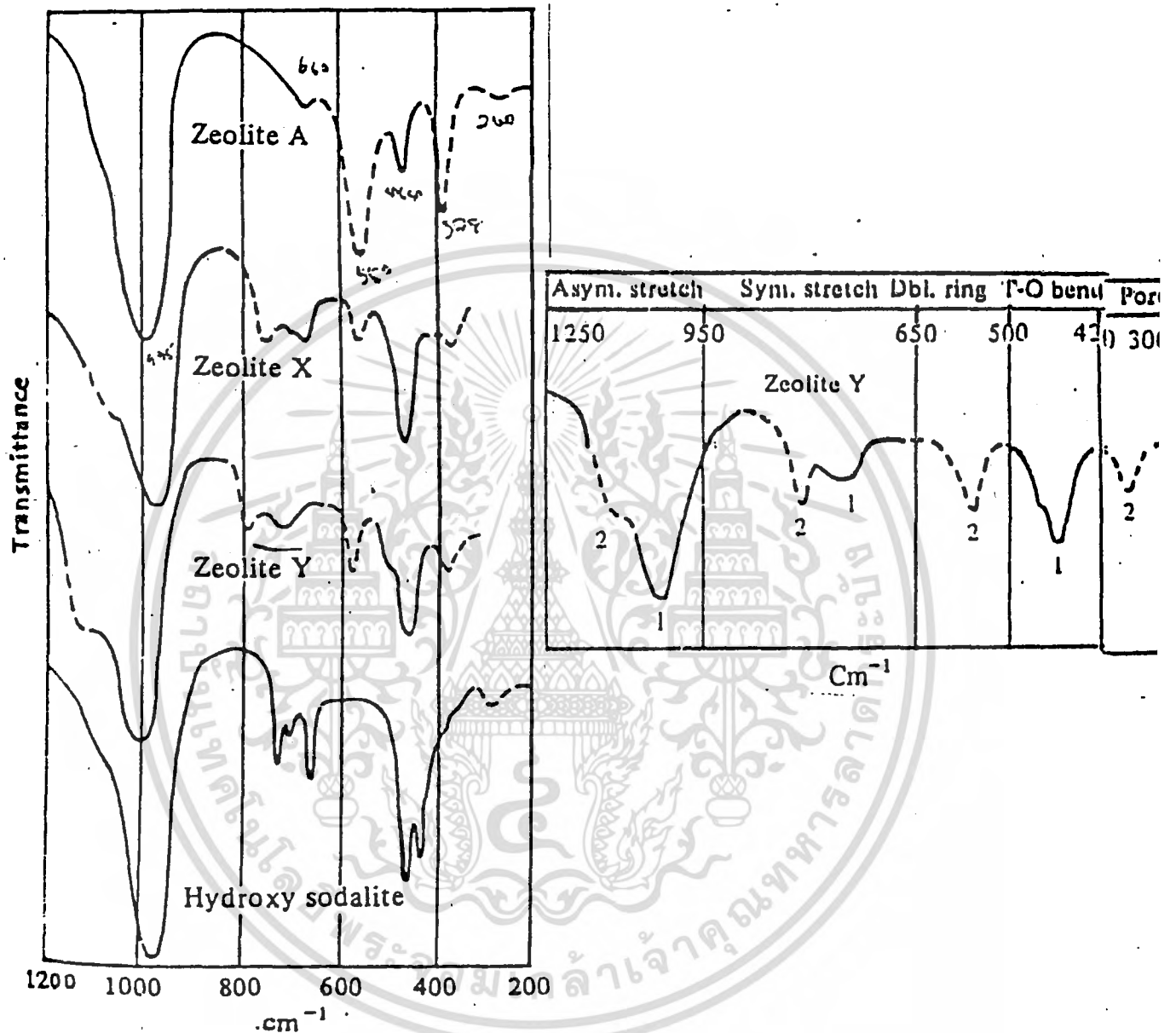
ลักษณะของสัญญาณอินฟราเรดที่ได้นั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงตำแหน่งของสเปคตรัม

	ลักษณะการสั้น	เลขคลื่น (เซนติเมตร) <sup>-1</sup>
1. การสั้นภายใน	- การยืดแบบไม่สมมาตร	1250-950
	- การยืดแบบสมมาตร	720-650
	- การงอของพันธะระหว่างซิลิกอน (อลูมิเนียม) กับออกซิเจน	500-420
2. การสั้นภายนอก	- การสั้นของวงคู่	650-500
	- การเปิดของโพรง	420-300
	- การยืดแบบสมมาตร	750-820
	- การสั้นแบบไม่สมมาตร	1150-1050 sh.

(จาก Breck, 1974, p.418.)

รูปที่ 2.19 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์ และไฮดรอกซีโซดาไลต์



(จาก Breck ,1974, pp.418-419)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์สังเคราะห์

Zeolite	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Asymmetric Stretch			Symmetric Stretch			cm <sup>-1</sup> Double Rings		T-O Bend		Pure Opening	
A	1.88	1090	1050	995			660	550		464		378	260
		vwsh	vwsh	s			vw	ms		m		ms	vwb
Ca <sup>ex</sup> A	1.9	1130	1055	998	742	705	665	542		460		376	
		vwsh	vwsh	s	vwsh	vwsh	vw	ms		m		m	
N-A	3.58	1131		1030	750		675	572		474		385	
		vwsh		s	vwsh		vw	ms		m		m	
N-A	6.01	1151		1044	750		698	581		475		393	
		vwsh		s	vwsh		vw	ms		m		m	
X	2.40		1060	971	746	690	668	560		458	406	365	250
			msh	s	m	wsh	m	m		ms	w	m	vwb
Y	3.42	1135		985	760		686	564		508	460	372	
		msh		s	m		m	m		vwsh	ms	m	
Y	4.87	1130		1005	784		714	635	572	500	455	380	260
		msh		s	m		m	vw	m	wsh	ms	m	vwb
La <sup>ex</sup> Y	5.0	1135		1006	790		705	565		500	450	382	
		msh		s	m		m	m		wsh	ms	m	
Y	5.63	1130		1017	789		718	645	575	504	456	383	315
		msh		s	m		m	vw	m	m	vwsh	m	vws
B (P)	2.8	1105		995	772	738	670	600				435	380
		msh		s	m	m	m	m				ms	inwsh
Hydroxy-sodalite (HS)	2.0	1096		986	729	701	660			461	432		282
		vwsh		s	m	mw	m			ms	ms		vwb
Ω	7.7	1130		1024	805		722	610		451		372	
		wsh		s	mw		mw	mw		ms		m	
ZK-5	6.0	1158		1048	890		730	572		445		408	
		wsh		s	vwb		mw	m		m		wsh	
R	3.25	1136		1007	738		678	625	508	452	426		370
		msh		s	w		w	m	mw	m	m		vwsh
G	5.44	1138		1027	720		696	632	515	460	408		378
		msh		s	w		wsh	m	m	m	m		vwsh
D	4.62	1184		1018	755		711	631	513	459	415		376
		msh		s	wsh		w	m	m	m	m		vwsh
S	2.5	1140		1020	770		722	623	sh	518	448	424	370
		wsh		s	vwsh	mw	vwsh	595	mb	mb	m	ms	vwsh
T	7.0	1156	1059	1010	771		718	623	575	467	433	410	366
		wsh	s	s	w		w	mw	w	ms	ms	vwsh	wsh
Hydroxy-cancrinite (HC)	2.0	1095	1035	1000	965	755	680	624	567	498	458	429	390
		mw	msh	s	msh	w	m	m	m	mw	ms	ms	mw
L	6.0	1160	1080	1015	767		721	642	606	580	474	435	375
		wsh	s	s	mw		mw	vwsh	m	wsh	ms	wsh	vwsh
C (Analcime-type)	4.0	1162	1012	952	740		686	615		442	410		
		vwsh	s	s	m		wb	vw		ms	msh		
Zeolon	9.95	1216	1180	1046	795		715	621	571	448			370
		w	vwsh	s	772		690	555	w	ms			vwsh
					wb		wb	w					
W	3.6	1128		1006	786		691	637	590	512	483	432	375
		msh		s	756		mw	mw	wb	vwsh	vwsh	ms	vwsh
							mw						

s = strong; ms = medium strong; m = medium; mw = medium weak; w = weak; vw = very weak; sh = shoulder; b = broad.

( จาก Breck , 1974 , Table 5.5 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์

ศึกษาโดยใช้เทคนิคเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน

โครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิดจะให้

รูปแบบของ เอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันต่าง ๆ กัน ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงรูปแบบของเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอ

h.k.l	$\text{Na}_{12}\text{A}^a$		$\text{K}_{12}\text{A}^b$		$\text{Ca}_6\text{A}^c$	
	$d(\text{Å})$	$I$	$d(\text{Å})$	$I$	$d(\text{Å})$	$I$
100	12.29	100	12.31	100	12.24	100
110	8.71	69	8.71	64	8.66	39
111	7.11	35	7.10	30	7.08	32
200	—	—	6.15	4	6.12	12
210	5.51	25	5.50	10	5.48	20
211	5.03	2	5.03	8	5.00	4
220	4.36	6	—	—	—	—
221, 300	4.107	36	4.105	33	4.084	35
310	—	—	3.895	10	3.875	2
311	3.714	53	3.714	62	3.696	34
222	—	—	3.555	5	3.539	4
320	3.417	16	3.414	34	3.398	18
321	3.293	47	3.292	35	3.276	38
400	—	—	3.078	12	—	—
410	2.987	55	2.985	80	2.972	32
322	—	—	—	—	—	—
411	2.904	9	2.902	27	2.888	9
330	—	—	—	—	—	—
420	2.754	12	2.753	65	2.741	7
421	2.688	4	2.687	9	2.676	3
332	2.626	22	2.625	18	2.614	24
422	2.515	5	2.514	28	2.502	7
430	2.464	4	—	—	2.451	7
500	—	—	—	—	—	—
431	—	—	2.415	4	—	—
510	—	—	—	—	—	—
511	2.371	3	2.370	9	2.359	3
333	—	—	—	—	—	—
520	2.289	1	2.287	3	—	—
432	—	—	—	—	—	—
521	2.249	3	2.248	5	2.238	3
440	2.177	7	2.177	26	2.166	8
441	2.144	10	2.143	12	2.141	8
322	—	—	—	—	—	—
530	2.113	3	—	—	2.103	5
433	—	—	—	—	—	—
531	2.083	4	2.081	5	2.074	2
600	2.053	9	2.053	3	2.042	4
442	—	—	—	—	—	—

(จาก Breck , 1974 , table 4.27)

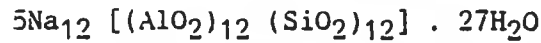
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(28)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

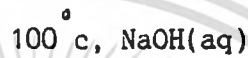
(2) สมบัติทางเคมี (Chemical properties)

2.1) ปฏิกิริยาที่เกิดกับเบสแก่ (reaction with strong base)

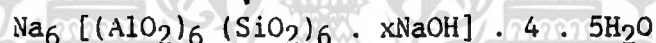
ซีโอไลต์เอ สามารถเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์พี โดยทำปฏิกิริยากับด่างในสภาวะที่เหมาะสมและสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮดรอกซีซีโอไลต์ (hydroxy sodalite, Hs) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ



ซีโอไลต์เอ



ซีโอไลต์พี



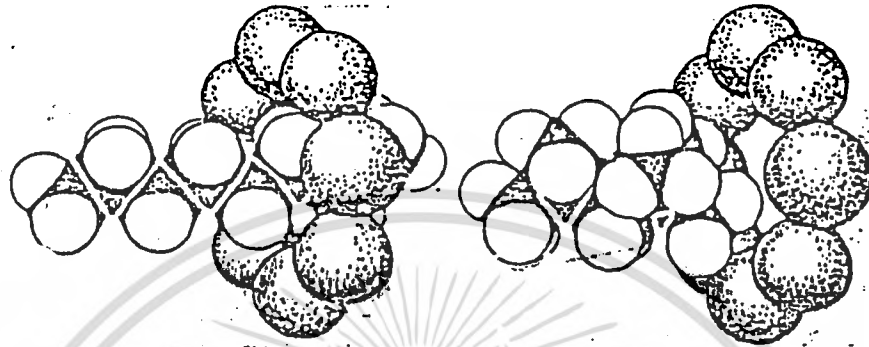
ไฮดรอกซีซีโอไลต์ ( $0 < x < 1$ )

จากการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ จะพบว่าซีโอไลต์พี บะบวมด้วยเสมอ ซีโอไลต์พีนี้ไม่สามารถเปลี่ยนกลับเป็นซีโอไลต์เอได้อีก แต่จะเปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกซีซีโอไลต์

2.2) สมบัติในการดูดซับของซีโอไลต์

เมื่อทำการกำจัดน้ำในโมเลกุลซีโอไลต์ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $350-400^\circ \text{C}$  เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงขึ้นไป รูพรุนในโมเลกุลของซีโอไลต์จะว่างเปล่าและสามารถดูดซับโมเลกุลอื่น ๆ ได้ ดังแสดงได้นรูปที่ 2.20

รูปที่ 2.20 แสดง (ซ้าย) โม่เลกุลเล็กถูกดูดซับไว้ , (ขวา) โม่เลกุลใหญ่ไม่ถูกดูดซับ



(จาก Frederick. A., vol.4, Fig.1, p.166.)

ซึ่งสมบัตินี้สามารถใช้ในการแยกสารบางอย่างออกจากกันได้ โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างโมเลกุล (selectivity of shape and size)

2.3) สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ (Cation-Exchange properties)

ไอออนบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนของซีโอไลต์จะเกาะอยู่ที่โครงร่างรูปทรงสี่หน้า ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายด้วยสารละลายเข้มข้นของไอออนตัวอื่น ๆ ซีโอไลต์จะมีค่าความจุสูงถึง 3-4 มิลลิอีควิวาเลนต์ (milliequivalents) ต่อกรัม ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณอนุภาคในโครงร่างผลึกนอกจากนี้ยังมีปัจจัยอย่างอื่น ๆ อีก โดยค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น จะบอกให้ทราบถึงจำนวนอนุภาคที่แทนซิลิกอนในโครงสร้ารูปทรงสี่หน้า ยิ่งมีอนุภาคที่ซิลิกอนมากเท่าใด การขาดประจุบวกก็ยิ่งมีมากเท่านั้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์

1. ธรรมชาติของไอออนบวก (ขนาด ประจุ)
2. โครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
3. ความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลาย
4. อุณหภูมิ

การแลกเปลี่ยนไอออนจะทำให้คุณสมบัติของซีโอไลต์เปลี่ยนไป อาทิเช่น

1. ความทนต่อความร้อน
2. การดูดซับ
3. ความไวต่อการเป็นคาตะลิสต์

ขบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแสดงได้ดังนี้



เมื่อ  $z_a$  และ  $z_b$  คือค่าประจุของไอออน A และ B ตามลำดับ

(z) และ (s) หมายถึงซีโอไลต์และสารละลาย (solution) ตามลำดับ

ถ้า  $A_z$  และ  $A_s$  หมายถึงสัดส่วนโมล (mol fractions) ของไอออนของไอ

ออน A ในซีโอไลต์และสารละลาย

$B_z$  และ  $B_s$  หมายถึงสัดส่วนโมล (mol fractions) ของไอออนของไอออน

A ในซีโอไลต์และสารละลาย

เมื่อนำค่า  $A_z$  กับ  $A_s$  และ  $B_z$  กับ  $B_s$  ไปสร้างกราฟดังตัวอย่างในรูปที่

2.21 จะได้กราฟของการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange isotherms)

จากกราฟจะได้ค่า  $\alpha_B^A$  เป็นตัวประกอบการแยก (separation factor)

$$\text{เมื่อ } \alpha_B^A = \frac{\text{พื้นที่ I}}{\text{พื้นที่ II}}$$

$$A_z B_s$$

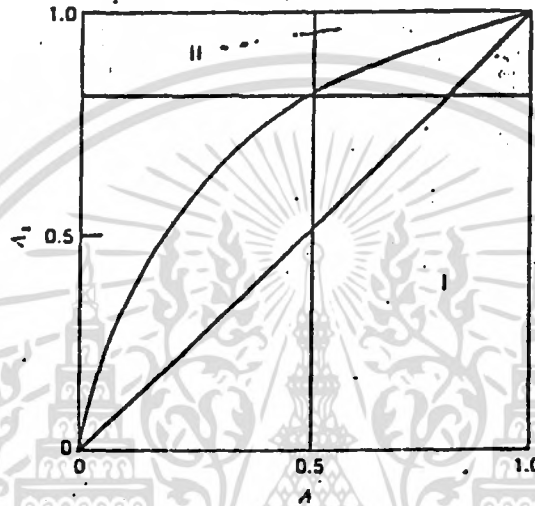
$$= \frac{\quad}{\quad}$$

$$B_z A_s$$

จะได้ว่าสัมประสิทธิ์การแยก (Selectivity coefficient)

$$K_B^A = \frac{A_z^{z_B} B_s^{z_A}}{B_z^{z_A} A_s^{z_B}}$$

ค่า  $K_B^A$  จะสามารถบอกถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของไอออนโลหะ  
 านซีไอไลต์ านซีไอไลต์จะสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนโลหะที่มีวาเลนซ์



รูปที่ 2.21 กราฟของการแลกเปลี่ยนไอออน ค่า  $K_B^A = \frac{I}{II}$

(จาก Breck, Encyclopedia, Fig. 9.)

ซึ่ง +1 หรือ +2 ซึ่งสามารถจัดเรียงไอออนของโลหะจากค่า Selectivity มากไป  
 นาน้อยได้ดังนี้

พวกที่มีวาเลนซ์ + 1 : Ag > Tl > Na > K > NH<sub>4</sub> > Rb > Li > Cs

พวกที่มีวาเลนซ์ + 2 : Zn > Sr > Ba > Ca > Co > Ni > Cd > Hg > Mg

อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนานซีไอไลต์จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของไอออนใน

โครงสร้างของซีไอไลต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับรัศมีของอนุภาค ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของไอออน  
 และอุณหภูมิตัวอย่างของการแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียมเอ็กซ์ (NaX) ซีไอไลต์ นั้นมี

การเคลื่อนที่ของไอออนของโซเดียมจากตำแหน่งที่สอง เข้าไปในแอลฟา-เดจ

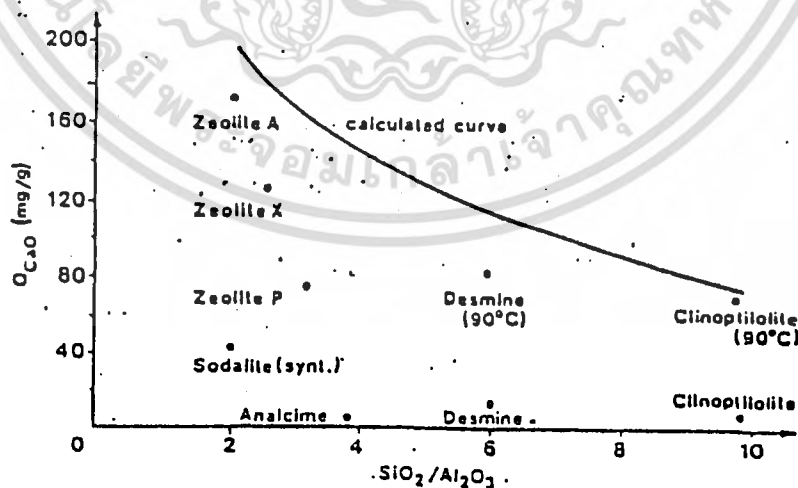
การแลกเปลี่ยนไอออนจะสมบูรณ์ขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ซีโอไลต์แต่ละตัวจะมีความสามารถน  
 การแลกเปลี่ยนไอออนแต่ละตัวไม่เหมือนกันขึ้นกับค่าความจุไอออนของซีโอไลต์นั้น ๆ ค่า  
 อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออลูมิเนียม จะมีความสำคัญต่อความจุ ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดงค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์

Zeolite	Si/Al ratio	meq/g.
chabazite	2	5
mordenite	5	2.6
erionite	3	3.8
clinoptilolite	4.5	2.6
zeolite A	1	7.0
zeolite X	1.25	6.4
zeolite Y	2.0	5.0

(จาก Breck, Encyclopaedia, table 2.)

รูปที่ 2.22 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ นอก  
 จากนี้ขนาดของอนุภาค ยังมีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนอีกด้วย ดังผลที่ได้ในรูปที่ 2.23

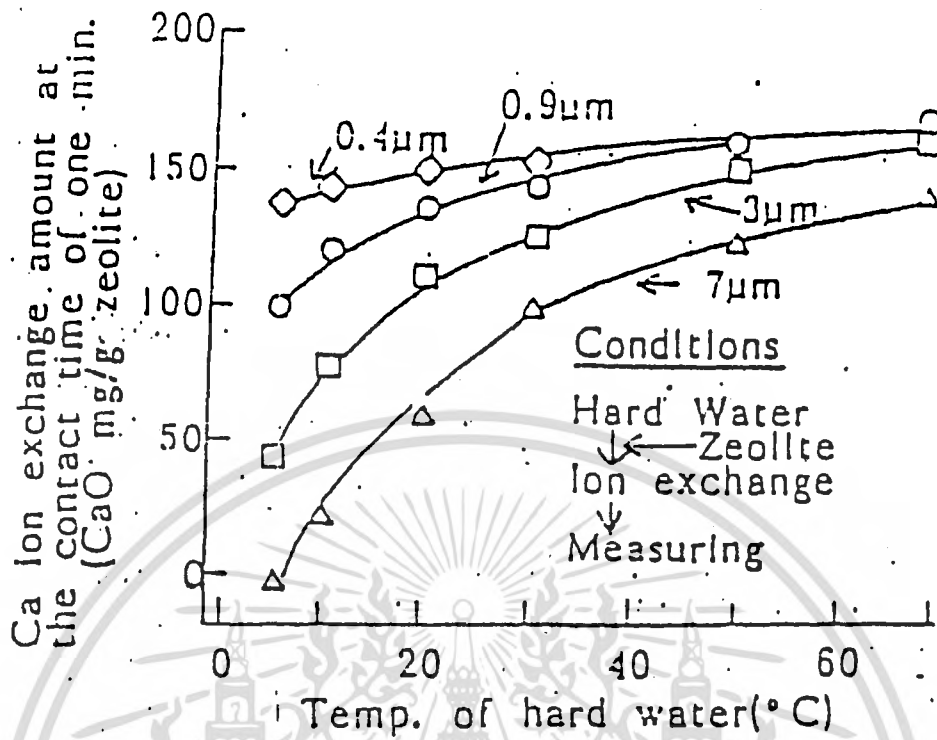


(จาก Smolka, 1978, p.490.)

(33).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.23 แสดงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อการแลกเปลี่ยนไอออน



(จาก Bruno 1987, p.26)

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

##### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์ให้ความร้อน (hot plate) ที่สามารถให้ความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 300 °c พร้อมแท่งแม่เหล็กสำหรับกวน (magnetic stirrer)
2. หม้อทาบฏิกิริยา (reactor)
3. ขวดสามคอ
4. เครื่องกวนเชิงกล (mechanical stirrer) แบบ RW20 ของบริษัท IKA labortechnik พร้อมใบกวน
5. ชุดกรองสารและกระดาษกรอง
6. อ่างน้ำมัน (oil bath)
7. เทอร์มิเตอร์ที่วัดได้ 0-300 °c
8. ถ้วยกระเบื้องและถ้วยนิกเกิล (nickle crucible)
9. เดซิเดเตอร์
10. เตาเผาที่สามารถเผาได้ถึงอุณหภูมิ 1100 °c
11. เครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) แบบ PW 1730/10 ของบริษัท Phillips
12. เครื่องอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer) Model IR-400 FT 1760X ของบริษัท Perkin-Elmer
13. เครื่องอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer) ฉบับ 1430 RATIO RECORDING DETECTOR ของบริษัท Perkin- Elmer
14. เครื่องเคลือบไอออน (Ion sputter) แบบ IFC-1100E ของบริษัท JEOL
15. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning electron microscope) แบบ JSM 5200 ของบริษัท JEOL
16. เครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แบบ UV-100

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. เครื่องเฟลม-อะตอมมิก แอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Flame-Atomic absorption spectrophotometer) แบบ AA680 ของบริษัท Shimadzu
18. เครื่องพีเอชมิเตอร์ แบบ CG 840 ของบริษัท SCHOTT
19. เครื่องวัดขนาดรูพรุน (Pore sizer) แบบ 9320 ของบริษัท Micromeritics

### สารเคมี

1. น้ำกลั่น (double distilled water)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 50%
3. ดินขาว (Kaolin) จากแหล่งหาดส้มแป้น อำเภอมือง จังหวัด ระนอง และแหล่ง อำเภอสูโงหงาดี จังหวัด นราธิวาส
4. โซเดียมเมตาซิลิเกตที่ปราศจากน้ำ ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  anhydrous)
5. อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ )
6. กรดเกลือ ( $\text{HCl}$ )
7. กรดแอซติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
8. กรดทาทาริก ( $\text{H}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_6$ )
9. แอมโมเนียมโมลิบเดต ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ )
10. โซเดียมแอซิเตต ( $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )
11. กรดไตรโอไกลิโคริก
12. อีโกลชารินเรด-เอส

### การสังเคราะห์ ซีโอไลต์ จากดินขาว

1. เตรียมสารละลายโซเดียมออลูมิเนต

ซึ่ง 50% NaOH มา 49.364 g ลงในบีกเกอร์ 250 cm<sup>3</sup> ตั้งบนแผ่นให้ความร้อน ทำการ heat และ stir จนกระทั่งอุณหภูมิเป็น 90-95 °C ซึ่ง  $\text{Al}(\text{OH})_3$  มา 2.382 g ใสลงในสารละลาย รอจนกระทั่งละลายหมด ซึ่งน้ำมา 71.660 g ค่อย ๆ เติมนลงในบีกเกอร์จนกระทั่งให้หมด

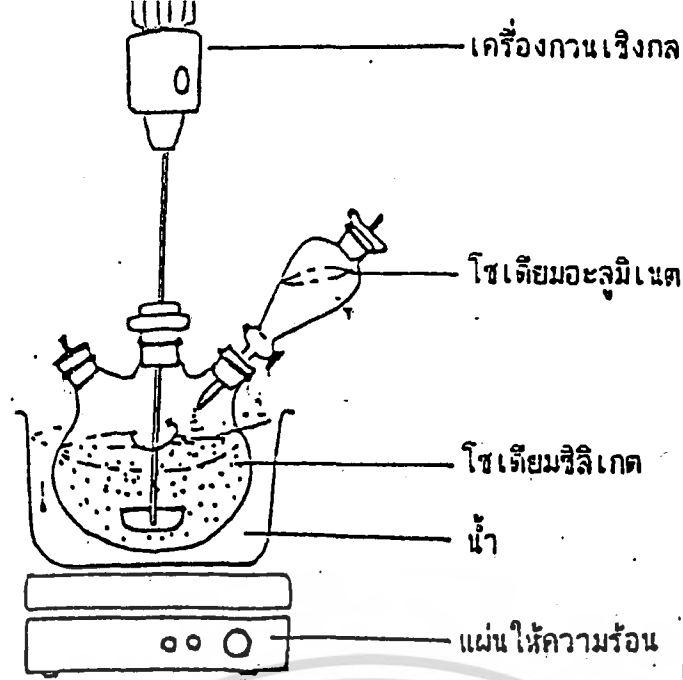
2. เตรียม slurry ของดินขาว

ซึ่งดินขาวมา 40 g นำไปเผาที่ 750 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ และ ซึ่งดินขาวที่เผาแล้วมา 26.67 g ใสลงในขวด 3 คอ เติม 50% NaOH 12.28 g น้ำ 101.14 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3. การทำปฏิกิริยา น้ำขวด 3 คอมาตั้งเครื่องมือตั้งรูป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทำการกวนด้วยความเร็ว 900 rpm อุณหภูมิ 60-65 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจาก 1 ชั่วโมงแล้ว เพิ่มอุณหภูมิเป็น 90-100 °c พร้อมทั้งหยุดสารละลายโซเดียมอลูมิเนต 2 cm<sup>3</sup>/min เป็นเวลา 120 นาที เพิ่มความเร็วในการกวนเป็น 1000 rpm เมื่อเติมสารละลายหมดแล้ว ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงครึ่ง โดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ กรองขณะร้อน และล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจำนวนมากหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งน้ำล้างมีพีเอชเป็นกลาง นำผลิตภัณฑ์ไปอบที่อุณหภูมิ 50-60 °c เป็นเวลา 16-20 ชั่วโมง

### การสังเคราะห์เตรียม ซีโอไลต์ด้วยวิธี ไฮโดรเจล

#### 1. การเตรียมสารละลายของโซเดียมอลูมิเนต

ตวง 50% NaOH 124.4 cm<sup>3</sup> ลงในเบีกเกอร์ 600 cm<sup>3</sup> ทำการ heat และ stir จนกระทั่งอุณหภูมิของสารละลายเป็น 90-95 °c ซึ่ง Al(OH)<sub>3</sub> มา 73.6875 g ต่อๆ 1. ใส่ลงในสารละลายที่ละลายจนละลายหมด จึงค่อย ๆ เติม Al(OH)<sub>3</sub> ลงไป จนกระทั่งละลายหมด ค่อย ๆ เติมน้ำ 221.2 cm<sup>3</sup> ลงในเบีกเกอร์ ที่ละลาย

#### 2. การเตรียมสารละลายของโซเดียมซิลิเกต

ตวง 50% NaOH มา 108.5 cm<sup>3</sup> ลงในเบีกเกอร์ 600 cm<sup>3</sup> เติมน้ำ 198.4 cm<sup>3</sup> และ ซึ่ง Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> มา 99.5 g 1. ใส่ลงในเบีกเกอร์ จนกระทั่งละลายหมดถ่ายลงในหม้อทำปฏิกิริยา

#### 3. การทำปฏิกิริยา

ตั้งหม้อปฏิกิริยา ดังรูป ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 90-100 °c พร้อมทั้งกวนอย่างสม่ำเสมอ เติมสารละลายโซเดียมอลูมิเนตลงไปให้หมดภายใน 15 นาที (ประมาณ 23 cm<sup>3</sup>/min) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(37)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กวนด้วยความเร็ว 1000 rpm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ กรองขณะร้อน พร้อมทั้งล้างผลิตภัณฑ์  
 ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจำนวนมากหลาย ๆ ครั้ง จนน้ำล้างตะกอนมี pH เป็นกลาง นำผลิตภัณฑ์ ไปอบ  
 ที่อุณหภูมิ 50-60 °c เป็นเวลา 16-20 ชั่วโมง

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาระยะที่ซีโอไลต์เอ โดยการเปลี่ยนสภาวะของการ  
 สังเคราะห์ดังนี้ คือ

ก. การศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังตารางที่ 3.1

NaOH (%)	14	18
----------	----	----

ข. การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้เปอร์เซ็นต์สารละลายโซ  
 เดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 14 และ 18 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°c)	70-90	90-100	100-120
---	-------	--------	---------

ค. การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการ เผาดินขาวก่อนทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาว (°c)	650	750
-----------------------------------	-----	-----

### 3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชัน

เป็นการศึกษาสภาพการจัดเรียงตัวของผลึก โดยแสดงในรูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ซึ่งเกิดจาก  
 การชนอิเล็กตรอนในผลึกของสาร แล้วเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น อาจเกิดการเสริมหรือหักล้างกัน  
 โดยเกิดขึ้นเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) สารตัวอย่างได้แก่ ดินขาวจากแหล่งระ  
 นองและนราธิวาส ดินขาวจากทั้งสองแหล่งที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 650 , 750 °c  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่ได้จากการสังเคราะห์จากทั้งสองวิธี และซีโอไลต์เอ มาตรฐาน โดยนำสารตัวอย่างมาอัดลงบนเซลล์ แล้วนำมาวัดด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกตีมิเตอร์ 40 กิโลวัตต์ 30 มิลลิแอมป์ วนช่วง  $10^3$  ระดับต่ำสุด 2.20 หน้าต่าง 3.50 ทว่าการวัดที่ 2: ที่มุม 4-46 องศา ด้วยอัตราเร็ว 1 องศา/นาที

### 3.3 การวิเคราะห์สารด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

นำดินขาวจากแหล่งระนองและนราธิวาส เผาดินขาวทั้งสองแหล่ง ที่อุณหภูมิ 650 , 750 °C โดยนำสารตัวอย่างมาอัดเป็นแผ่นด้วยโพแทสเซียมโบรไมด์ เรียกว่า "KBr disc" แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่เลขคลื่น  $4000 \text{ cm}^{-1}$  ถึง  $200 \text{ cm}^{-1}$

### 3.4 การวิเคราะห์โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

ศึกษาลักษณะรูปร่างของผลึกซีโอไลต์เอ โดยนำสารตัวอย่างไปติดบนเซลล์ แล้วนำไปเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบไอออน นำไปส่องด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป โดยใช้กำลังขยาย 10000 เท่า ถึง 20000 เท่า

### 3.5 การหาความหนาแน่น

ความหนาแน่นของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ และซีโอไลต์มาตรฐานสามารถหาได้ด้วยวิธีแทนที่น้ำ มีการคำนวณดังนี้

$$D = (M_2 - M_1) / [(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)]$$

D = ความหนาแน่นของสาร (กรัม/มิลลิลิตร)

M<sub>1</sub> = น้ำหนักขวด

M<sub>2</sub> = น้ำหนักขวดและสารตัวอย่าง

M<sub>3</sub> = น้ำหนักขวด น้ำหนักสารตัวอย่างและน้ำ

M<sub>4</sub> = น้ำหนักขวดและน้ำ

### 3.6 การหาค่าความเป็นต่าง

ซึ่งสารตัวอย่าง 1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 150 cm<sup>3</sup> เติมน้ำกลั่นลงไป 100 cm<sup>3</sup> ทิ้งการกวนเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าพีเอชด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์

### 3.7 การหาพื้นที่ผิวภายในรูพรุนและปริมาตรภายในรูพรุนทั้งหมด

พื้นที่ผิวภายในรูพรุนของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้และซีโอไลต์เอมาตรฐาน สามารถหาโดยใช้เครื่อง Pore Sizer แบบ 9320 ของบริษัท Micromeritics.

### 3.8 การหาค่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของซิลิกาต่ออลูมินา (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

การหาค่าซิลิกาต่ออลูมินาของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถหาได้โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. หาเปอร์เซ็นต์ซิลิกาโดยอาศัยการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิลิกากับแอมโมเนียมลิบเดต สารประกอบเชิงซ้อนนี้ให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ซึ่งแปรผันตามความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน
2. หาเปอร์เซ็นต์อลูมินาโดยอาศัยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมินากับแคลเซียมอลูมิเนม อโลซารินเรด-เอส สารประกอบเชิงซ้อนนี้ให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร ซึ่งแปรผันตามความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน

สามารถพลอตกราฟระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์อลูมินาและเปอร์เซ็นต์ซิลิกากับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานได้กราฟเส้นตรง เมื่อนำสารตัวอย่างมาวัดค่าการดูดกลืนแสงก็สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์อลูมินาและซิลิกาของสารตัวอย่างนั้นได้จากกราฟ

### 3.9 การหาค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก

ซึ่งสารตัวอย่าง ได้แก่ ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ ซีโอไลต์เอมาตรฐาน ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนและใกล้เคียงกับ 1 กรัม นำไปแช่ในสารละลายของไอออนบวกเข้มข้น 0.5 mol/dm<sup>3</sup> ปริมาตร 10 cm<sup>3</sup> แช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายส่วนที่ปล่อยออกจากสารตัวอย่าง ใช้ปิเปตขนาด 0.25 cm<sup>3</sup> ดูดสารละลายส่วนที่ปล่อยออกมา นำไปเจือจางเพื่อหาปริมาณของไอออนบวกที่เหลืออยู่ในสารละลายของไอออนบวก โดยเครื่องอะตอมมิคแอนบอลซ์แบบ AA 680 ของบริษัท Shimadzu

ผลการทดลองและสรุปผลวิจารณ์

4.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ จากแร่ดินขาวและวิธีไฮโดรเจล

จากการทดลองโดยวิธีไฮโดรเจล พบว่าเมื่อเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกต แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเจลสีขาวขุ่นเมื่อทำปฏิกิริยาต่อไปจะ  
ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผลึกผงสีขาวละเอียด โดยมีเปอร์เซ็นต์การสังเคราะห์ดังนี้

เมื่อใช้ปริมาณเบส 18% NaOH จะได้ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ได้ 84.42%

เมื่อใช้ปริมาณเบส 14% NaOH จะได้ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ได้ 83.66%

ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการเปลี่ยนสภาพของแร่ดินขาว (Clay conversion) ในตอนแรกดินขาวจากแหล่งระนองจะมีลักษณะสีแดงอิฐ เป็นผงละเอียด ส่วนดินขาวจากแหล่งนราธิวาสจะมีสีขาวขุ่นเป็นผงละเอียด เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง 650<sup>o</sup>c, 750<sup>o</sup>c ดินจากทั้งสองแหล่ง จะมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน

ดินจากแหล่งระนอง หลังจากทำปฏิกิริยาแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้ม ส่วนดินจากแหล่งนราธิวาส หลังจากทำปฏิกิริยาแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น โดยมีเปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ดังตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาว

ซีโอไลต์	เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้	
	650 <sup>o</sup> c	750 <sup>o</sup> c
สังเคราะห์จากดินระนอง	62.10	60.57
สังเคราะห์จากดินนราธิวาส	60.37	59.69

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์สารด้วยเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน

ผลการวิเคราะห์สารแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบพีคที่ตำแหน่งของ 2θ บ่งชี้ว่าเมื่อมีการเผาหินขาวที่อุณหภูมิสูงขึ้นตำแหน่งของ 2θ บางตำแหน่งหายไปเนื่องจากการยุบตัวของโครงสร้าง โดยเมื่อเผาหินขาวที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้พีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 12.45, 18.4, 25.0 หายไปและความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 8.8, 20.8 และ 24.6 สูงขึ้นจากแหล่งระนองรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3

งานดินจากแหล่งนราธิวาสมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับดินจากแหล่งระนองดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6

เมื่อทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ปรากฏว่าได้พีค 2θ ขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกับซีโอไลต์มาตรฐาน รูปที่ 4.7 ซึ่งมีตำแหน่ง 2θ และความสูงของพีคดังตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.2 แสดงค่ามุม 2θ และความสูงของพีค (%)

2θ	เปอร์เซ็นต์ความสูงของพีค
7.2	58.56
10.2	46.41
12.55	40.33
16.2	35.36
17.8	2.76
20.4	9.39
21.7	55.25
22.9	5.52
24.1	95.03
26.2	25.41
27.2	80.66
30.0	100.00
30.9	14.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (42) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2θ	เปอร์เซ็นต์
32.6	20.99
33.4	6.63
34.2	65.19
35.8	11.05
36.6	7.73
38.1	6.08
40.2	4.97
41.6	12.71
42.3	7.73
42.9	4.97
43.6	4.97
44.2	14.92
47.4	8.84
48.0	6.08
49.2	2.76
49.8	4.97
52.7	19.89

โดยานซีโอโลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีตำแหน่งมากกว่าในซีโอโลต์มาตรฐานเนื่องจากในซีโอโลต์ที่สังเคราะห์ได้มีสารเจือปน โดยซีโอโลต์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธี hydrogel process บางตัว จะมีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 14,24.3,31.6,34.8 ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคของ hydroxy sodalite จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการสังเคราะห์สูงขึ้นจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็น hydroxy sodalite เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.8-4.17

(43)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลท์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธี clay conversion จะมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่  
ขึ้นตรงกับซีโอไลท์เอมาตราฐานโดยมีพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง 2θ เกินมาขึ้นที่ 8.8, 26.6 ซึ่งเมื่อเทียบกับ  
พื้นที่ผิวของดินเมตาเคลสติดรูปที่ 4.2, 4.3, 4.5, 4.6 พบว่าเป็นตำแหน่งของดิน  
เมตาเคลส แสดงว่าไม่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของดินเป็นซีโอไลท์ได้ทั้งหมด ดังรูปที่ 4.15  
ถึงรูปที่ 4.18

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19 , 4.24 เปรียบเทียบสเปกตรัมของดินขาวจากแหล่งระนองใน  
รูปที่ 4.19 , 4.20 และ 4.21 จะพบว่าพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง 1033 , 913, 793, 753, 690,  
537, 468, 430, 392, 379  $\text{cm}^{-1}$  จากตารางที่ 2.8 แสดงว่าดินขาวมีโครงสร้างเป็นรูป  
เหลี่ยมสี่หน้าที่เชื่อมโยงกันทำให้เกิดโพรงภายในโครงสร้างดินขาว เมื่อดินขาวถูกเผาที่อุณหภูมิ  
650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้สเปกตรัมในรูปที่ 4.20 เหลือพื้นที่ตำแหน่ง  
996, 854, 717, 588, 441  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการเชื่อมโยงระหว่างรูปเหลี่ยมสี่หน้าในดินขาวถูกทำลาย  
ลงด้วยความร้อนกลายเป็นเมตาเคลส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาสูงขึ้นเป็น 750 องศาเซล  
เซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเหลือพื้นที่ตำแหน่ง 1083, 801, 460  $\text{cm}^{-1}$  แสดงว่ามีการยุบ  
โครงสร้างลงอีก มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเมตาเคลสมากขึ้น

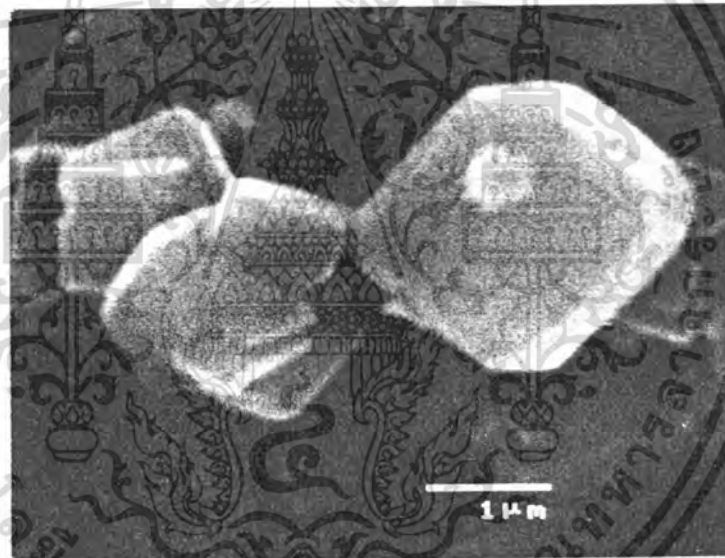
จากรูป 4.22 ถึง 4.24 เปรียบเทียบสเปกตรัมของดินขาว จากแหล่งนราธิวาส พบว่ามี  
แนวโน้มสเปกตรัมเช่นเดียวกับสเปกตรัมของดินขาวจากแหล่งระนอง โดยดินขาวจากแหล่งนรา  
ธิวาสจะมีพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง 1113, 1033, 1099, 914, 793, 755, 696, 539, 470, 430, 361.5  
 $\text{cm}^{-1}$  เมื่อผ่านการเผาที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โครงสร้างจะยุบตัว  
กลายเป็นเมตาเคลส มีพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง 1080, 813, 460, 374  $\text{cm}^{-1}$  และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ  
สูงขึ้นคือ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง 1090, 813, 374

จากรูป 4.25 ถึง 4.33 พบว่าซีโอไลท์มาตรฐานรูปที่ 4.25 มีพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง  
1003, 667, 460, 550, 370  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อทำการสังเคราะห์ซีโอไลท์ด้วยวิธีการทั้งสอง  
(hydrogel process and Clay conversion) จะทำให้ได้สเปกตรัมของซีโอไลท์สัง  
เคราะห์ขึ้นพื้นที่ผิวที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้นจากผล เอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชัน ในการทดลองที่ 3.2  
และ ผลอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในการทดลองนี้ สามารถยืนยันได้ว่า ซีโอไลท์ที่สัง  
เคราะห์ได้มีลักษณะโครงสร้างภายในเหมือนซีโอไลท์เอมาตราฐาน

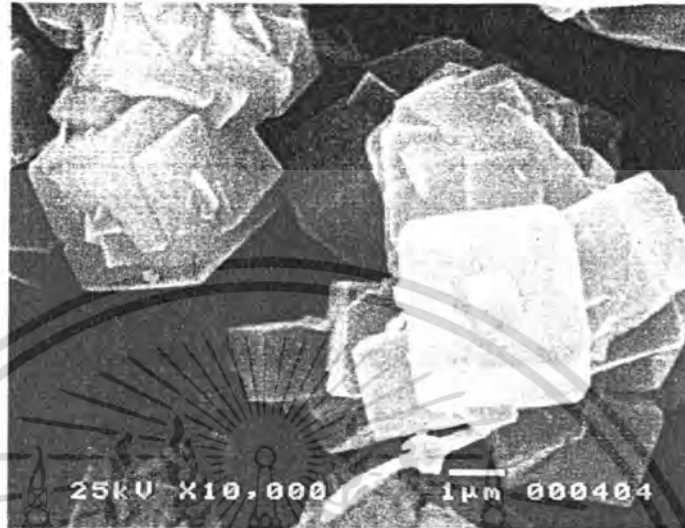
#### 4.4 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป

จากรูปพบว่า ซีโพลต์เอทีสังเคราะห์ได้มีรูปร่างเหมือนซีโพลต์เอมาตรฐาน คือ เป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์แต่มีขนาดเล็กกว่า ซีโพลต์เอมาตรฐานประมาณ 1-2 เท่า ดังรูปแสดงที่ 4.34 ถึงรูปที่ 4.38

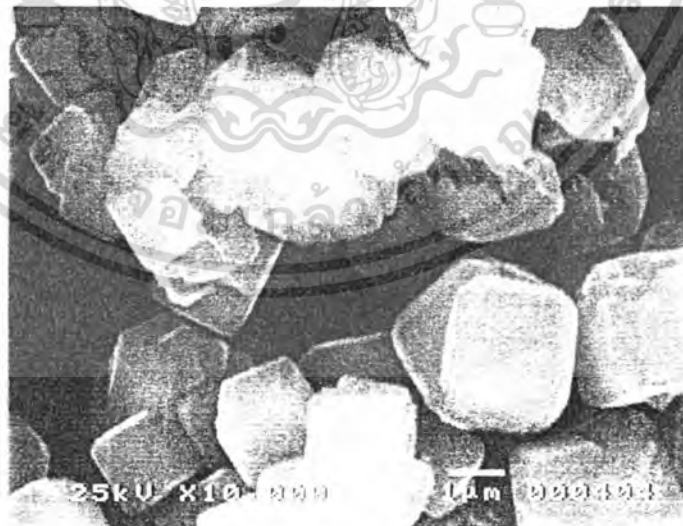
รูปที่ 4.34 แสดงซีโพลต์เอมาตรฐานกำลังขยาย 20000 เท่า



รูปที่ 4.35 แสดงซีไอแอลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก 14 % NaOH 70-90 °C  
กำลังขยาย 10000 เท่า



รูปที่ 4.36 แสดงซีไอแอลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก 18% NaOH 90-100 °C กำลังขยาย  
10000 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.37 แสดงซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวแหล่งระนอง ที่ผ่าน  
การเผาที่อุณหภูมิ 650 °C กำลังขยาย 10000 เท่า



รูปที่ 4.38 แสดงซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวจากแหล่งนราธิวาสที่  
ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 650 °C กำลังขยาย 10000 เท่า



#### 4.5 ผลการหาความหนาแน่น

ผลการทดลองพบว่าดินขาวที่ผ่านการเผามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นขึ้นกับโครงสร้างภายในดิน ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซีโวลต์เอทีสังเคราะห์ได้จากวิธีไฮโดรเจล และวิธีเปลี่ยนแปลงสภาพดินขาวมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับซีโวลต์เอมาตรฐาน แสดงผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของดินขาวก่อนนำมาทำการสังเคราะห์

ดินขาว	ความหนาแน่น	
	ดินระนอง	ดินนราธิวาส
ดินขาวที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125 °C	2.29	2.17
" เเผา " 650 °C	1.85	1.79
" เเผา " 750 °C	2.40	2.37
" เเผา " 850 °C	2.42	2.39
" เเผา " 1050 °C	2.60	2.51

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของซีโอไลต์

สารตัวอย่าง	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ซีโอไลต์เอมาตรฐาน	1.99
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก 14% NaOH 70°-90° C	1.99
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก 14% NaOH 90°-100° C	1.97
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก 18% NaOH 70°-90° C	2.01
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก 18% NaOH 90°-100° C	1.99
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระนองที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 650° C	1.99
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระนองที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 750° C	1.99
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินร้าวที่ผ่านการ เผาที่อุณหภูมิ 650° C	2.02
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินร้าวที่ผ่านการ เผาที่อุณหภูมิ 750° C	1.98

#### 4.6 ผลการหาค่าความเป็นด่าง

จากการทดลองพบว่าซีโอโลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์มีค่า pH ใกล้เคียงกับซีโอโลต์มาตรฐานเท่ากับ 10.95 ซึ่งความเป็นด่างของซีโอโลต์ได้จาก ๖๕ เต็มมาไอออนในโครงสร้างของซีโอโลต์ดังแสดงผลไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า pH ของดินขาวก่อนการสังเคราะห์ซีโอโลต์ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีต่างๆ

ดินขาว/ผลิตภัณฑ์ซีโอโลต์สังเคราะห์	pH
ดินระนองที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125° C	5.75
ดินนราธิวาสที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125° C	5.77
ซีโอโลต์เอามาตรฐาน	10.95
ซีโอโลต์สังเคราะห์ที่ใช้ 14% NaOH	10.88
ซีโอโลต์สังเคราะห์ที่ใช้ 18% NaOH	10.86
ดินระนองเผาที่ 650° C	10.47
ดินระนองเผาที่ 750° C	10.66
ดินนราธิวาสเผาที่ 650° C	10.40
ดินนราธิวาสเผาที่ 750° C	10.74

#### 4.7 ผลการหาพื้นที่ผิว และปริมาตรภายในรูพรุนทั้งหมด

ผลการทดลองพบว่า ซีโอโลต์สังเคราะห์ที่ได้มีพื้นที่ผิวภายในรูพรุนและปริมาตรภายในรูพรุนมากกว่าซีโอโลต์เอามาตรฐาน แสดงว่าปริมาณโครงสร้างผลึกภายในซีโอโลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีมากกว่าของซีโอโลต์เอามาตรฐาน เนื่องจากพื้นที่ผิวภายในรูพรุนแปรผันตามปริมาณการเกิดผลึกและขึ้นกับความเร็วในการกวนขณะทำปฏิกิริยา เมื่อความเร็วในการกวนสูงขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวภายในรูพรุนและปริมาตรภายในรูพรุนมากขึ้น ดังแสดงผลในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรภายในรูพรุนทั้งหมดของซีโอไลต์

ผลิตภัณฑ์	ความเร็วรอบ ของเครื่องปั่น (รอบ/นาที)	ปริมาตรภายในรูพรุนทั้งหมด (ลบ.ซม. / กรัม)	พื้นที่ผิวภายในรูพรุน (ตารางเมตร/กรัม)
ซีโอไลต์สังเคราะห์	-	0.2536	0.554
14%NaOH	1000	0.5739	2.088
18%NaOH	600	0.663	3.132
"	800	0.6951	4.294
"	1000	0.8748	4.335
"	1200	0.9162	4.424
"	1400	0.9372	4.910
"	2000	0.9493	5.755
ดินระนอง 650 °C	1000	1.3741	1.618
ดินระนอง 750 °C	1000	0.8916	0.447
ดินนราฯ 650 °C	1000	1.2720	1.9420
ดินนราฯ 750 °C	1000	0.8199	1.5158

#### 4.8 ผลการหาค่าอัตราส่วนโดยมวลของซิลิกาต่ออลูมินา

แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา

สาร	มวลของซิลิกา	มวลของอลูมินา	มวลของซิลิกาต่อมวลของอลูมินา
ดินระนองที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125 °c	0.70	0.240	2.917
ดินนราธิวาสที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125 °c	0.500	0.240	2.083
ซีโอไลต์เอมาตรฐาน	0.303	0.218	1.390
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จาก 14% NaOH	0.305	0.236	1.390
18% NaOH	0.275	0.206	1.335
ดินระนองที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 °c	0.275	0.206	1.335
ดินระนองที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 750 °c	0.336	0.255	1.318
ดินนราธิวาสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 °c	0.348	0.275	1.265
ดินนราธิวาสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 750 °c	0.275	0.218	1.261

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา (52) ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อดินขาวผ่านการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นซีโอไลต์เอ จะทำให้จำนวนโมลของซิลิกาตกลง เนื่องจากซิลิกาในโครงสร้างถูกแทนที่ด้วยอลูมินา ทำให้เกิดภาวะขาดประจุบวกขึ้น จึงต้องมีการจับไอออนบวกเพื่อสมดุลของประจุ ซึ่งประจุบวกที่ได้ก็คือโซเดียมไอออน เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนโมลพบว่า ซีโอไลต์เอสังเคราะห์ที่ได้จาก 14% NaOH มีค่าน้อยกว่าซีโอไลต์เอมาตรฐาน เนื่องจากมีการแทนที่ของซิลิกาไอออนด้วยอลูมินาไอออนไม่มากนัก เนื่องจากปฏิกิริยายังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่วนซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวจากแหล่งระนองที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 °C จะมีอัตราส่วนโมลใกล้เคียงกับซีโอไลต์เอมาตรฐาน แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นซีโอไลต์เอโดยสมบูรณ์

#### 4.9 ผลการหาค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก

ผลการทดลองพบว่าซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีแนวโน้มของค่าความจุการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเช่นเดียวกับซีโอไลต์เอมาตรฐาน คือ  $Pb^{2+} > Ca^{2+} > Zn^{2+} > Mg^{2+}$  ซึ่งเห็นว่าค่าความจุการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีไฮโดรเจลที่ใช้ NaOH 18% จะให้ค่าใกล้เคียงกับซีโอไลต์เอมาตรฐาน ขณะที่ซีโอไลต์เอสังเคราะห์ที่ได้จากวิธีการเปลี่ยนสภาพดินขาวมีค่าน้อยกว่าซีโอไลต์เอมาตรฐาน เนื่องจากดินเมตาเคอลินมีการเปลี่ยนสภาพเป็นซีโอไลต์เอได้ไม่หมด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (มิลลิอีควิวาเลนซ์)

สาร	Pb <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
ซีโอไลต์เอมาตรฐาน	5.349	2.584	3.237	0.582
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จาก				
14% NaOH	5.213	2.228	2.852	0.597
18% NaOH	5.404	2.415	3.004	0.627
ดินระนอง 650 °c	4.612	2.256	2.853	0.621
ดินระนอง 750 °c	4.438	2.201	2.678	0.618
ดินนราธิวาส 650 °c	4.875	2.402	2.662	0.621
ดินนราธิวาส 750 °c	4.871	2.296	2.644	0.619

ผล: Pb<sup>2+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Zn<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองเตรียมซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเจล (hydrogel process) และวิธีการเปลี่ยนสภาพดินขาว (clay conversion) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของวิธีไฮโดรเจลใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18% w/v ที่อุณหภูมิ 90-100<sup>o</sup> c อัตราส่วนโดยโมลของ SiO<sub>2</sub> ต่อ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 1.72 กวนด้วยความเร็ว 1000 rpm ได้ซีโอไลต์เอสังเคราะห์ 84.42% และสภาวะที่เหมาะสมของวิธีการเปลี่ยนสภาพดินขาว ทำโดยนำดินขาวมาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ซีโอไลต์เอสังเคราะห์ พบว่าเมื่อทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650<sup>o</sup> c จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 62.10 % ซึ่งสูงกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากดินขาวที่ผ่านการเผาที่ อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และดินขาวจากจังหวัดระนองมีความเหมาะสมในการนำมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์มากกว่า

ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซีโอไลต์เอมาตรฐาน แสดงได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงคุณสมบัติต่างๆของซีโอไลต์เอมาตรฐานและซีโอไลต์เอสังเคราะห์

คุณสมบัติ	ซีโอไลต์เอมาตรฐาน (1)	ซีโอไลต์เอสังเคราะห์	
		วิธีไฮโดรเจล (2)	วิธีเปลี่ยนสภาพดิน
1. รูปแบบของเอ็กซ์เรย์	7.2, 10.2, 12.5, 16.2	7.2, 10.2, 12.5, 16.2	7.2, 10.2, 12.5
ดิฟแฟรกชัน ตำแหน่ง 2	21.8, 24.1, 27.2, 30.0,	21.8, 24.1, 27.2, 30.0,	16.2, 21.8, 24.1
ที่สำคัญ (องศา)	34.2	34.2	27.2, 30.0, 34.1
2. ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน			
T-O asym.strech (cm <sup>-1</sup> )	1000	1000	995
T-O asym.strech (cm <sup>-1</sup> )	660	660	660
Double ring (cm <sup>-1</sup> )	560	560	560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติ	ซีโอไลต์เอมาตรฐาน(1)	ซีโอไลต์เอสังเคราะห์	
		วิธีไฮโดรเจล(2)	วิธีเปลี่ยนสภาพดินขาว <sup>(3)</sup>
T-O bending( $\text{cm}^{-1}$ )	460	460	460
Pore opening( $\text{cm}^{-1}$ )	370	375	375
3.รูปร่างของผลึก	รูปลูกบาศก์	รูปลูกบาศก์	รูปลูกบาศก์
4.พื้นที่ผิวทั้งหมดภายในรูพรุน ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	0.554	4.335	1.618
5.ปริมาตรทั้งหมดภายในรูพรุน ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	0.2536	0.8748	1.3741
6.ความหนาแน่น( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.99	1.99	1.99
7.ค่าความเป็นด่าง	10.95	10.88	10.47
8.การแลกเปลี่ยนไอออน	$\text{Pb}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{Pb}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{Pb}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
9.อัตราส่วนโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	1.390	1.335	1.335
10.ผลึกฤทธิ์(%)	-	84.42	62.10

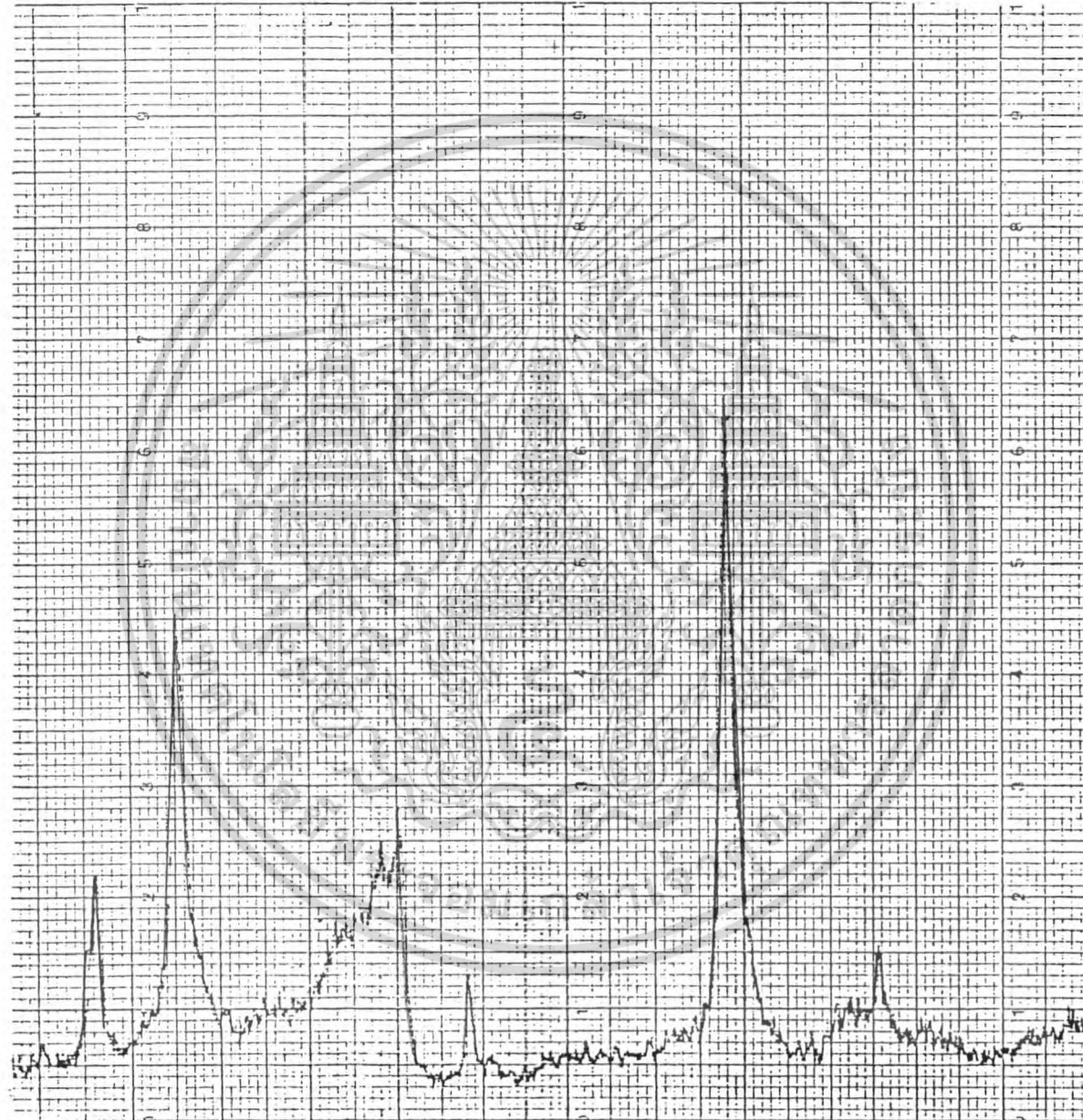
ตารางท้ายบท

- 1) ซีโอไลต์เอจากบริษัทคอลเกต-ปาล์มโอสีฟ จำกัด
- 2) ซีโอไลต์สังเคราะห์โดยวิธี NaOH 18% 90-100 °C
- 3) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากดินระนองที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 °C

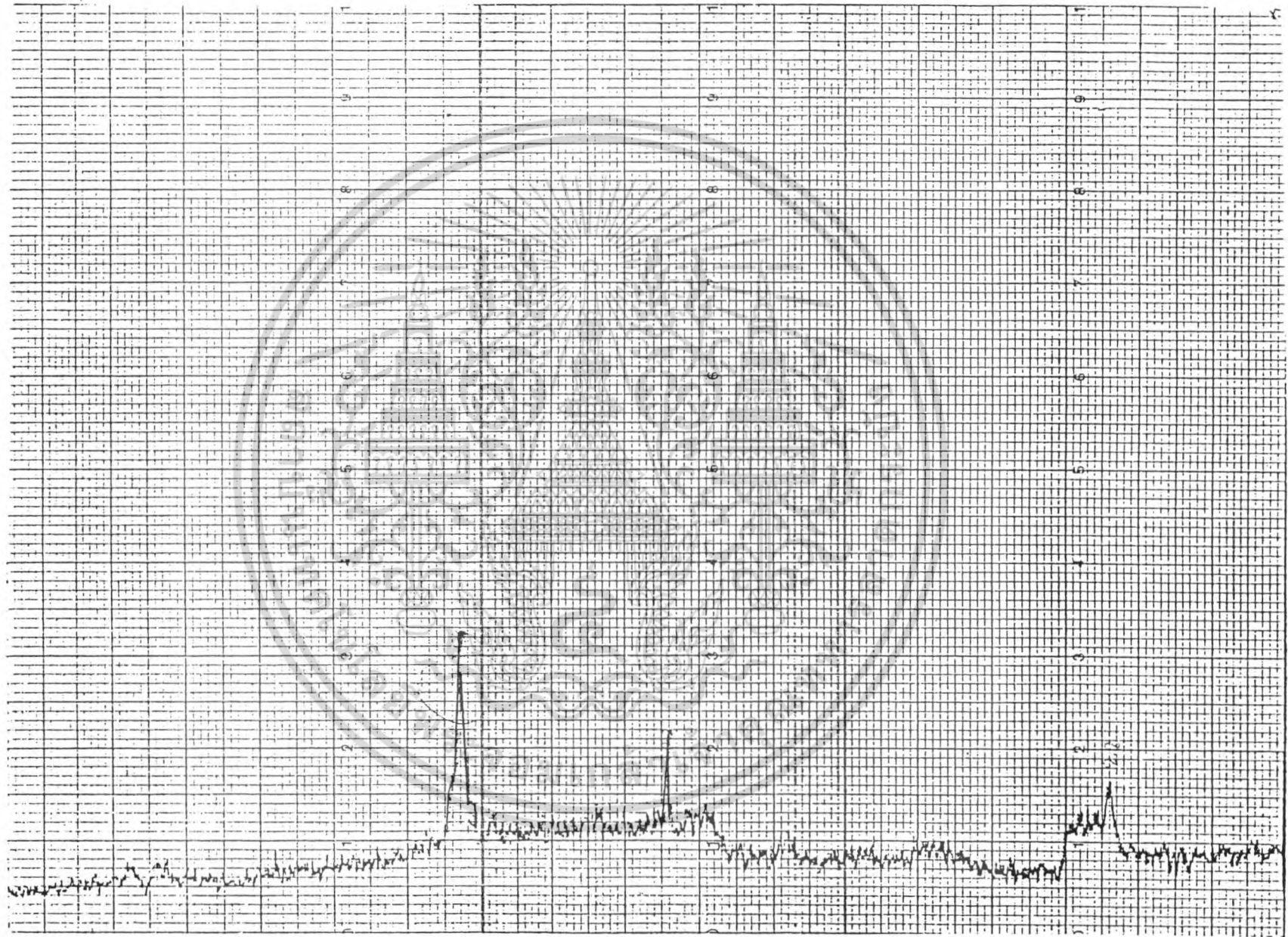
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อเสนอแนะแนวทางการค้นคว้าในอนาคต

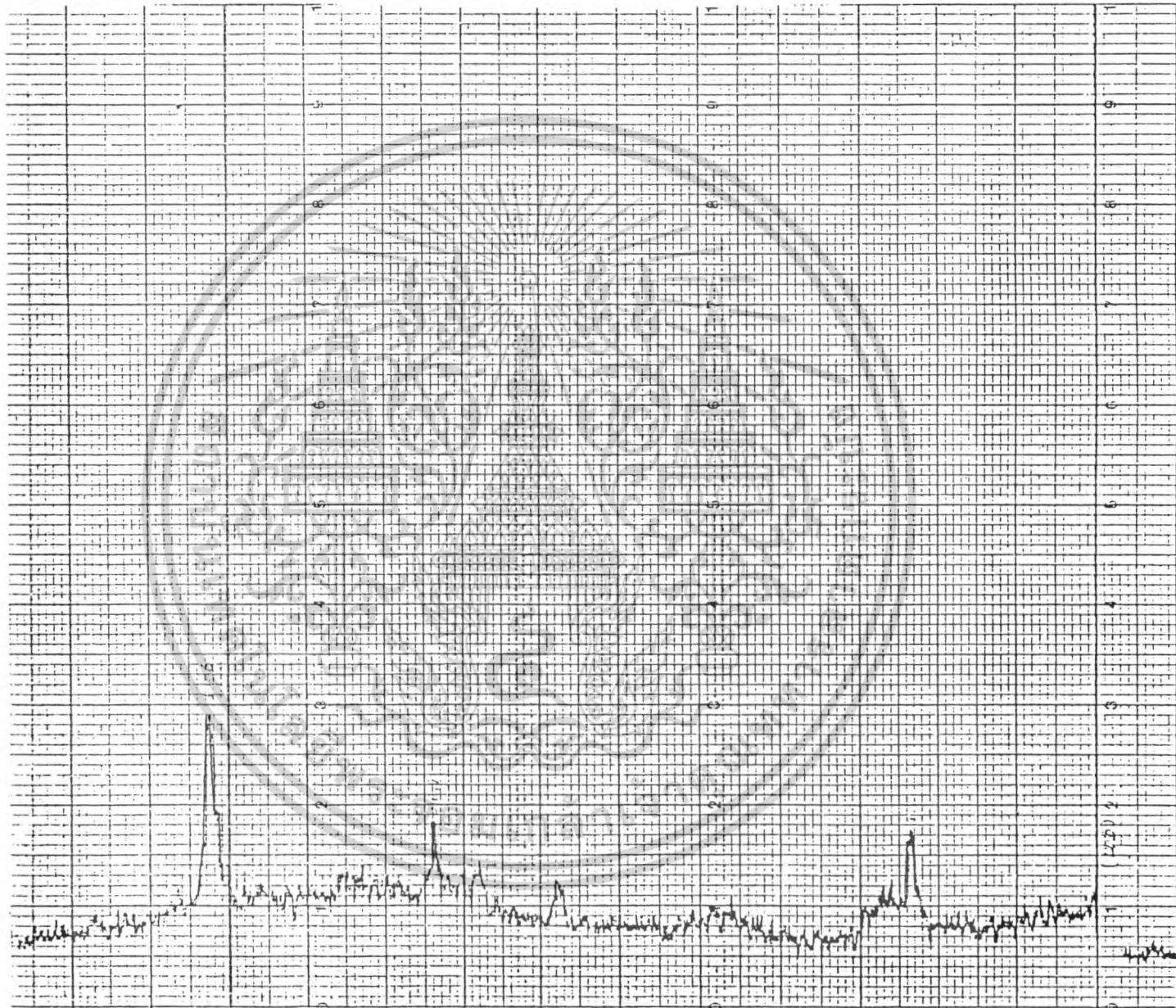
1. ในการทดลองควรใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมอุณหภูมิการทาบฏิกิริยาให้คงที่ และทำการล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจำนวนมากให้ทั่วถึงทุกส่วนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้สารอื่นที่ไม่ต้องการ
2. ควรศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของดินขาวไปเป็นเมตาเคอลิน เพื่อหาเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมเมตาเคอลินจากดินแหล่งต่างๆ
3. ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทาบฏิกิริยา
4. มีการศึกษาสมบัติอื่นๆของซีโอไลต์เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ต่อไป
5. ควรมีการทดลองประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ในแง่ต่างๆ เช่นการผสมในผงซักฟอกเพื่อเพิ่มความสามารถในการซักล้าง การใช้ในการบำบัดน้ำเสีย การใช้ในทางการเกษตร การใช้ในการวิจัยอื่นๆ เป็นต้น



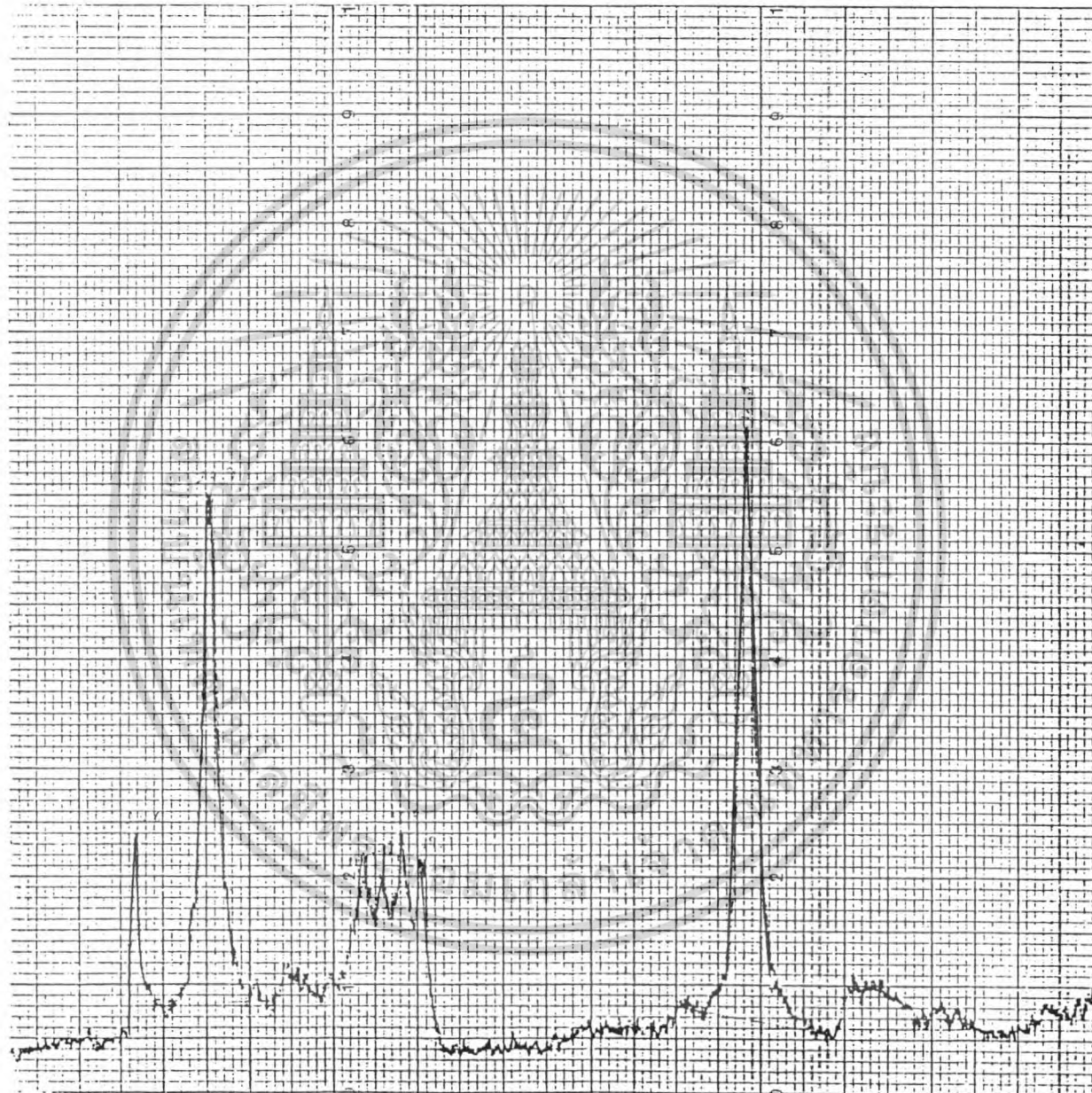
รูปที่ 4.1 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคชันของดีเอชเอวีที่ผ่านถารอบที่อุณหภูมิ 125 °c



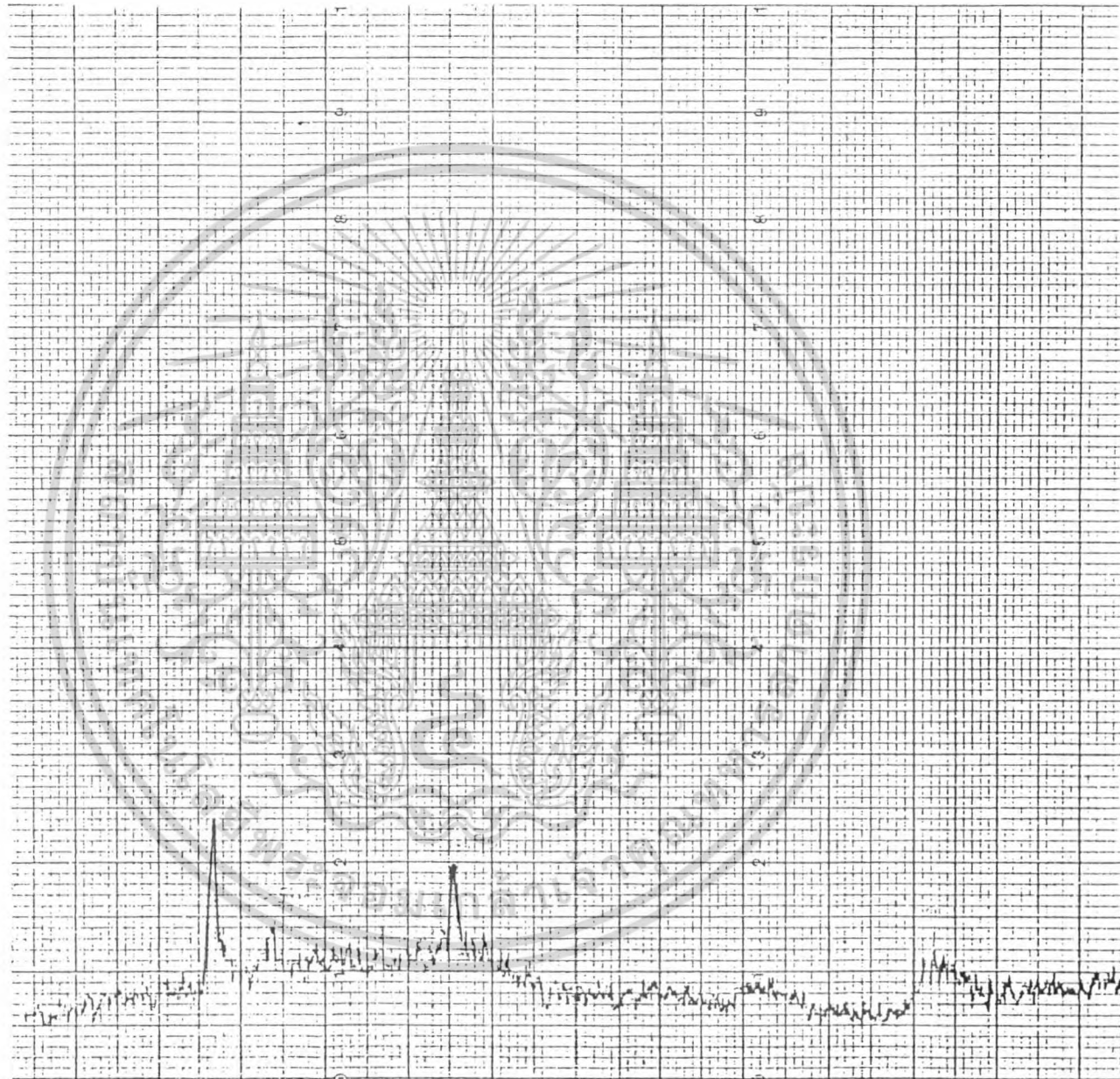
รูปที่ 4.2 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของดินระยองที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ  $650^\circ\text{C}$



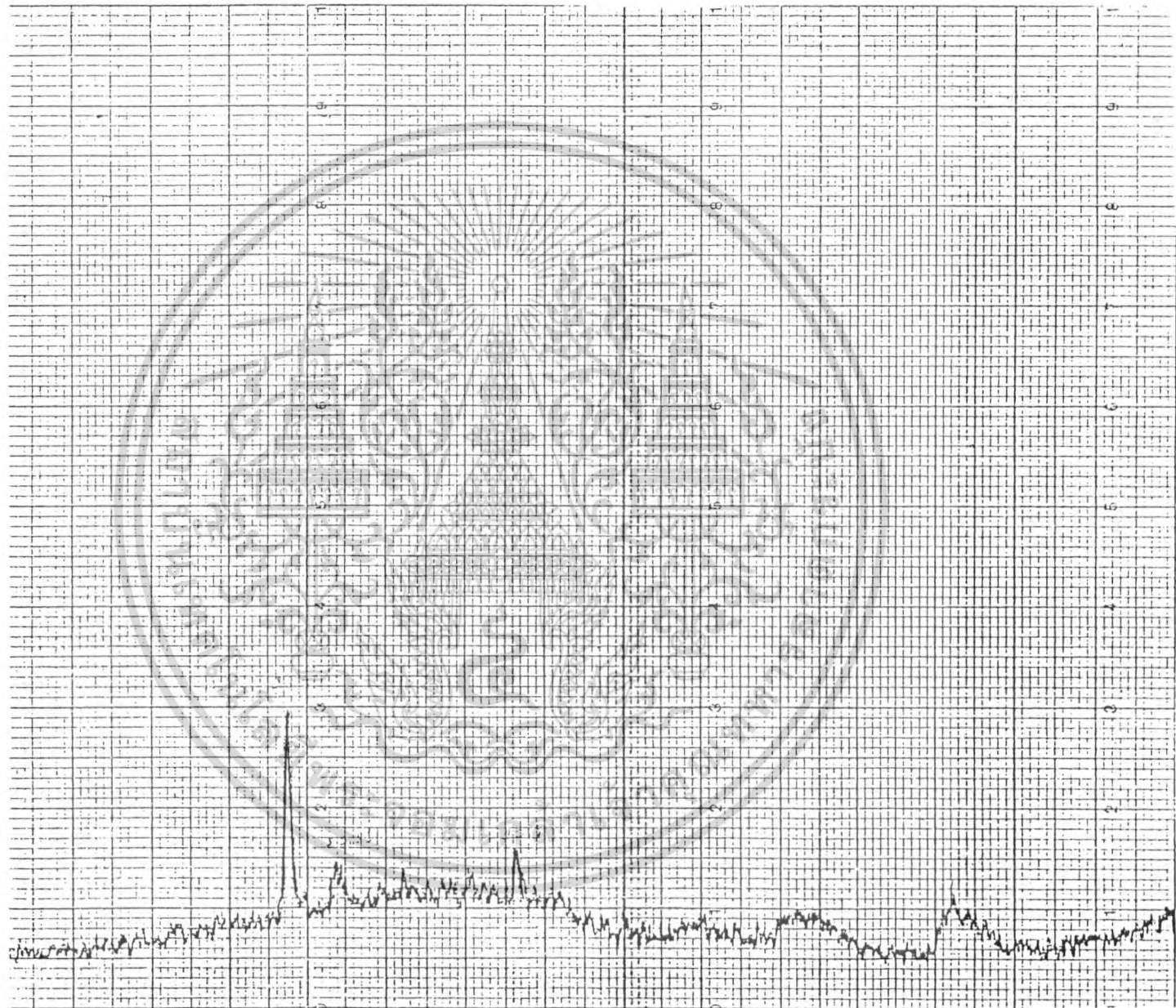
รูปที่ 4.3 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคชันของดีเอระเองที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ  $750^\circ\text{C}$



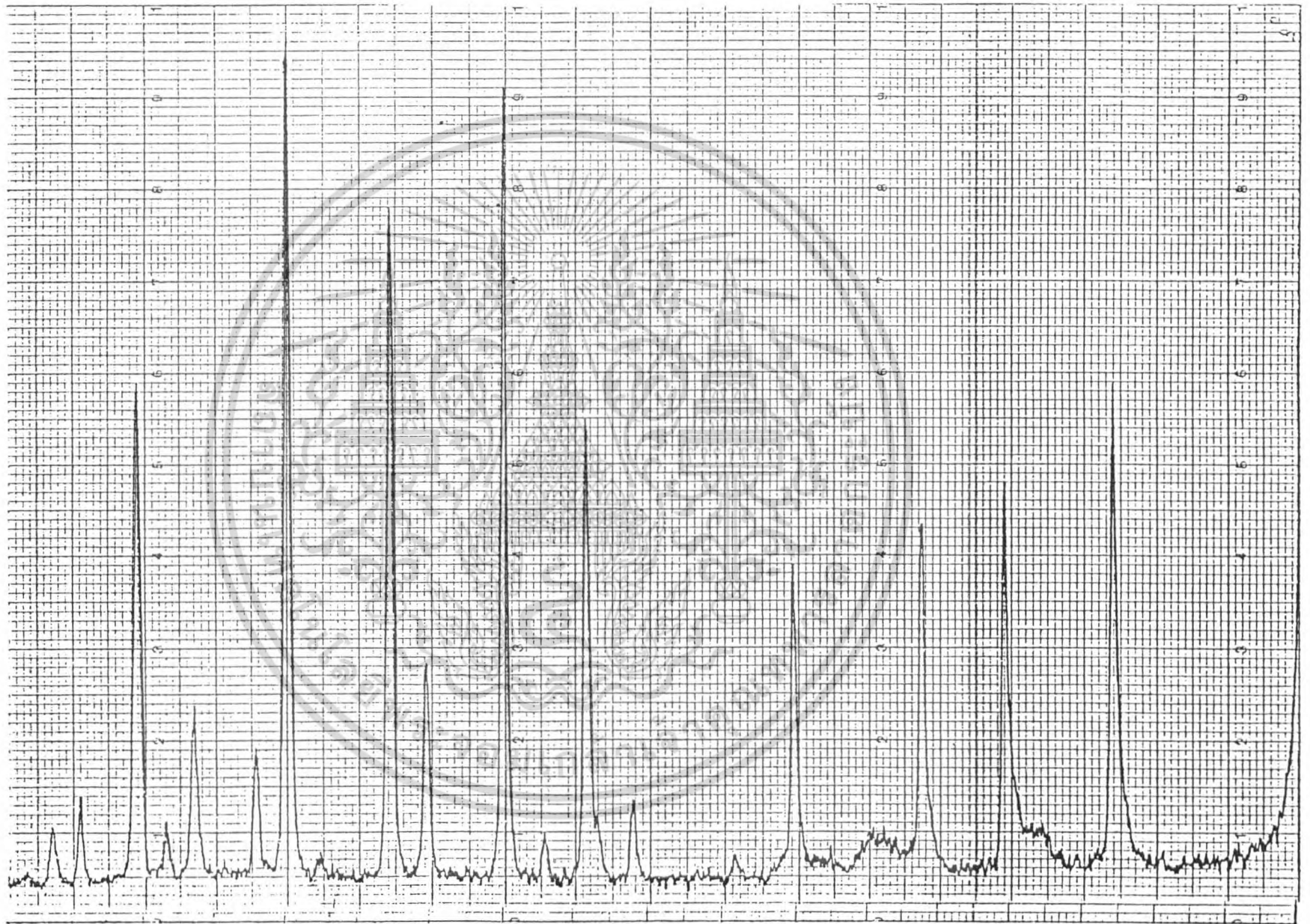
รูปที่ 4.4 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคชันของดินเหนียววาสที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125 °C



รูปที่ 4.5 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดัฟแฟรคชันของดินร่วนที่อุณหภูมิ 650° c

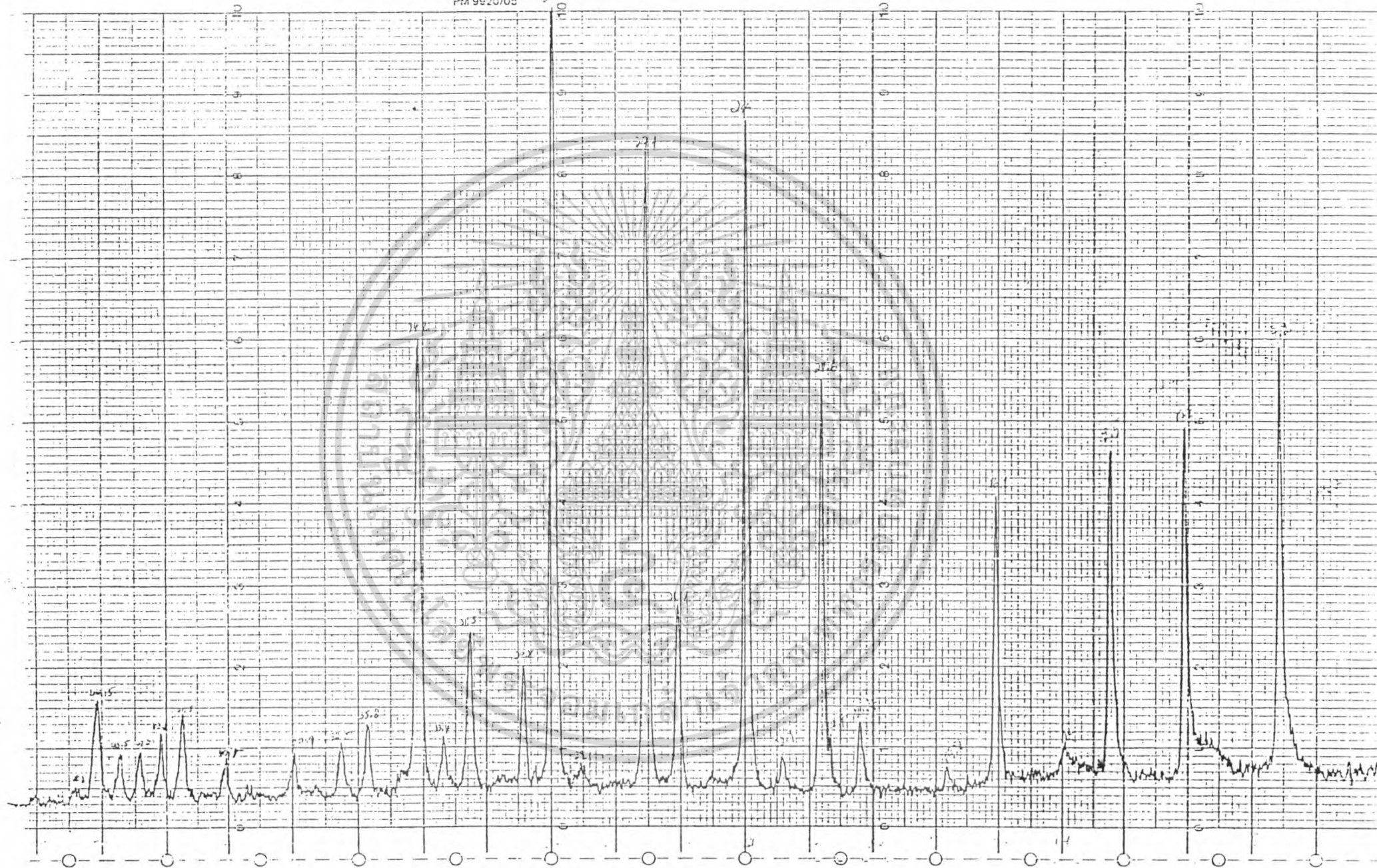


รูปที่ 4.6 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของดินเขราธิวาสที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 750°C

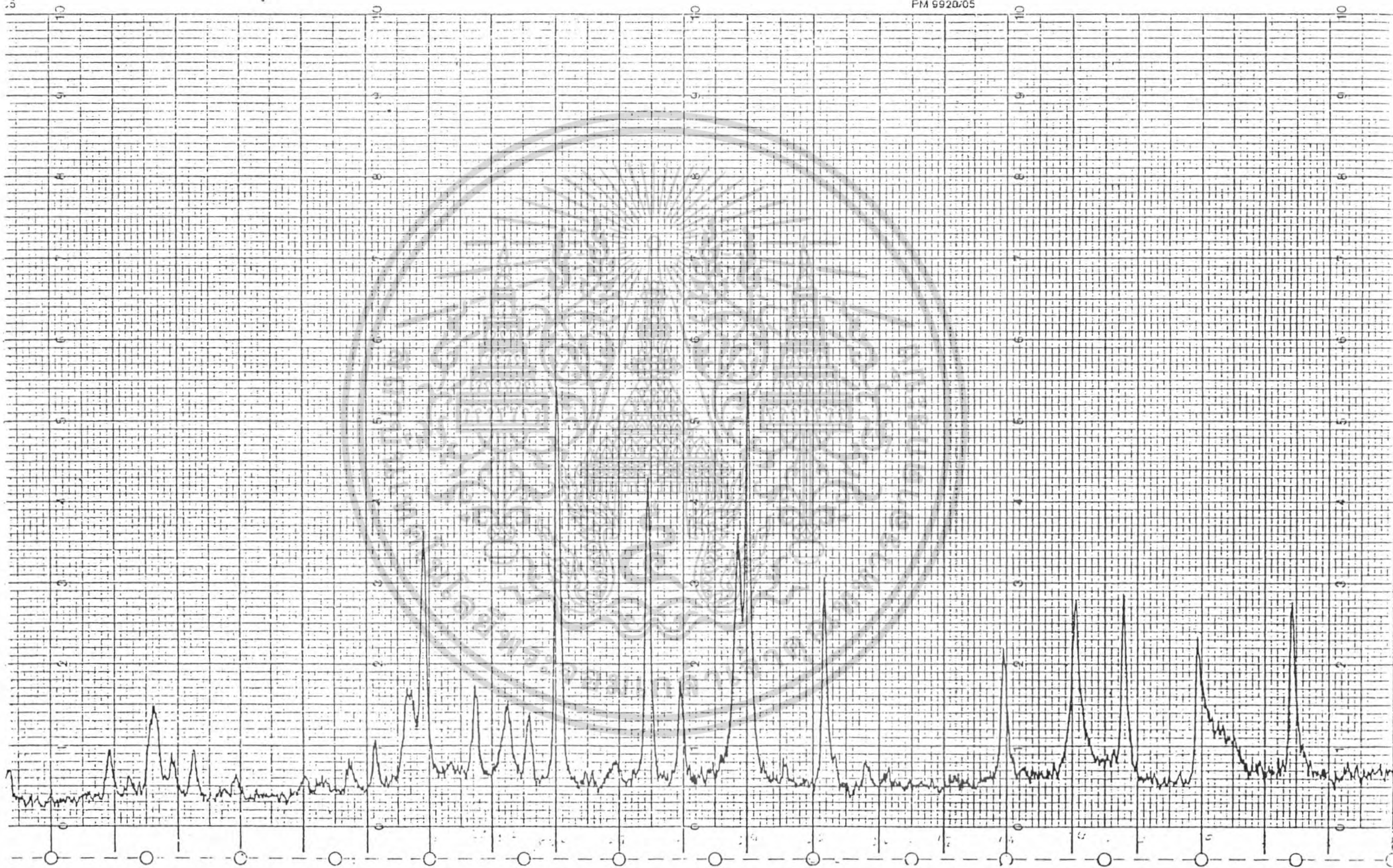


รูปที่ 4.7 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ คิฟเฟอกรังของซีโพลีเอทิลีน

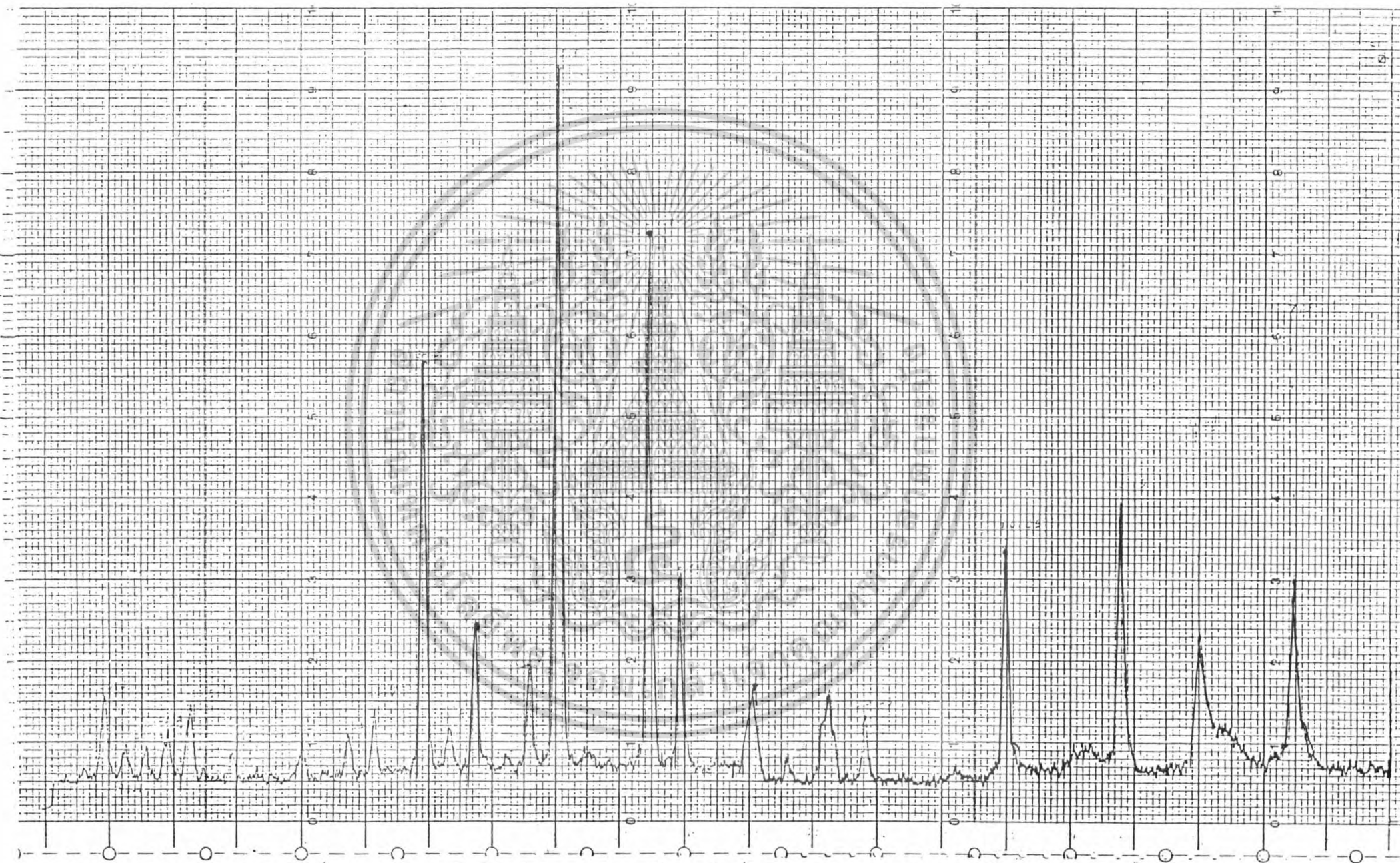




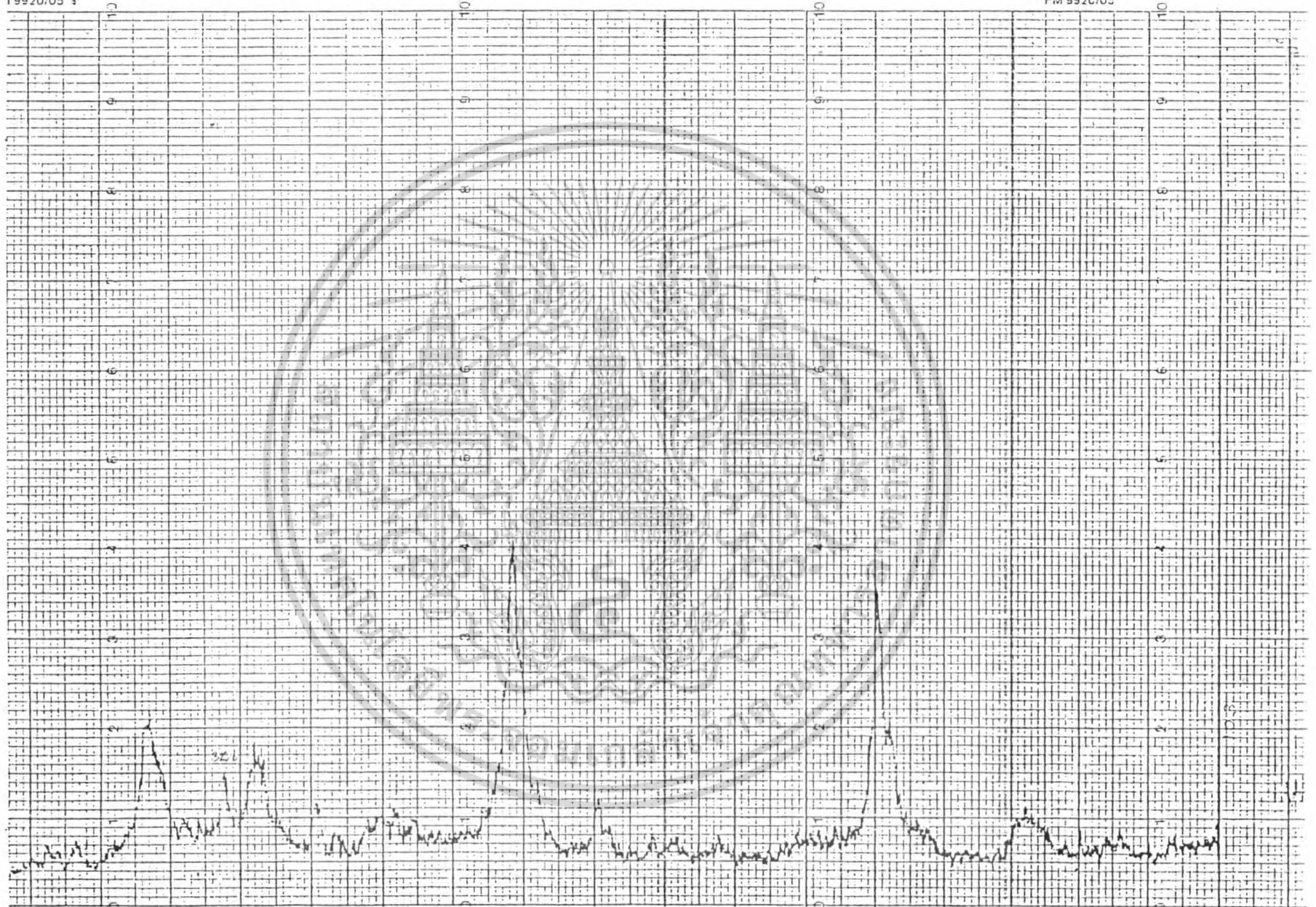
รูปที่ 4.9 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (18% NaOH 90 °c-100 °c)



รูปที่ 4.10 รูปแอมเปอริจ-เวย์ ดิฟเฟอเรนเชียลของซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ได้ (18% NaOH 100°c-120°c)



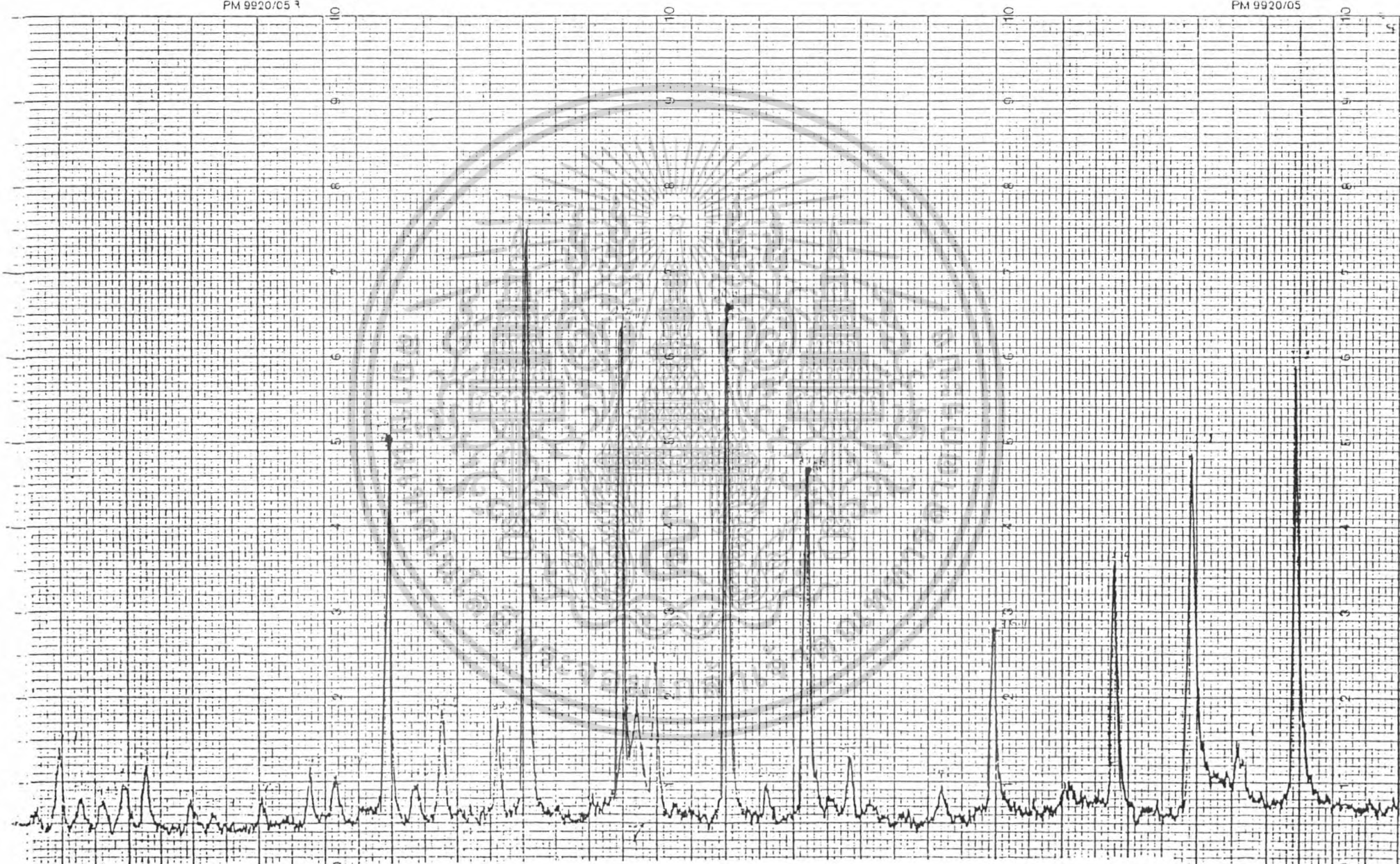
รูปที่ 4.11 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (14% NaOH 70° c-90° c)



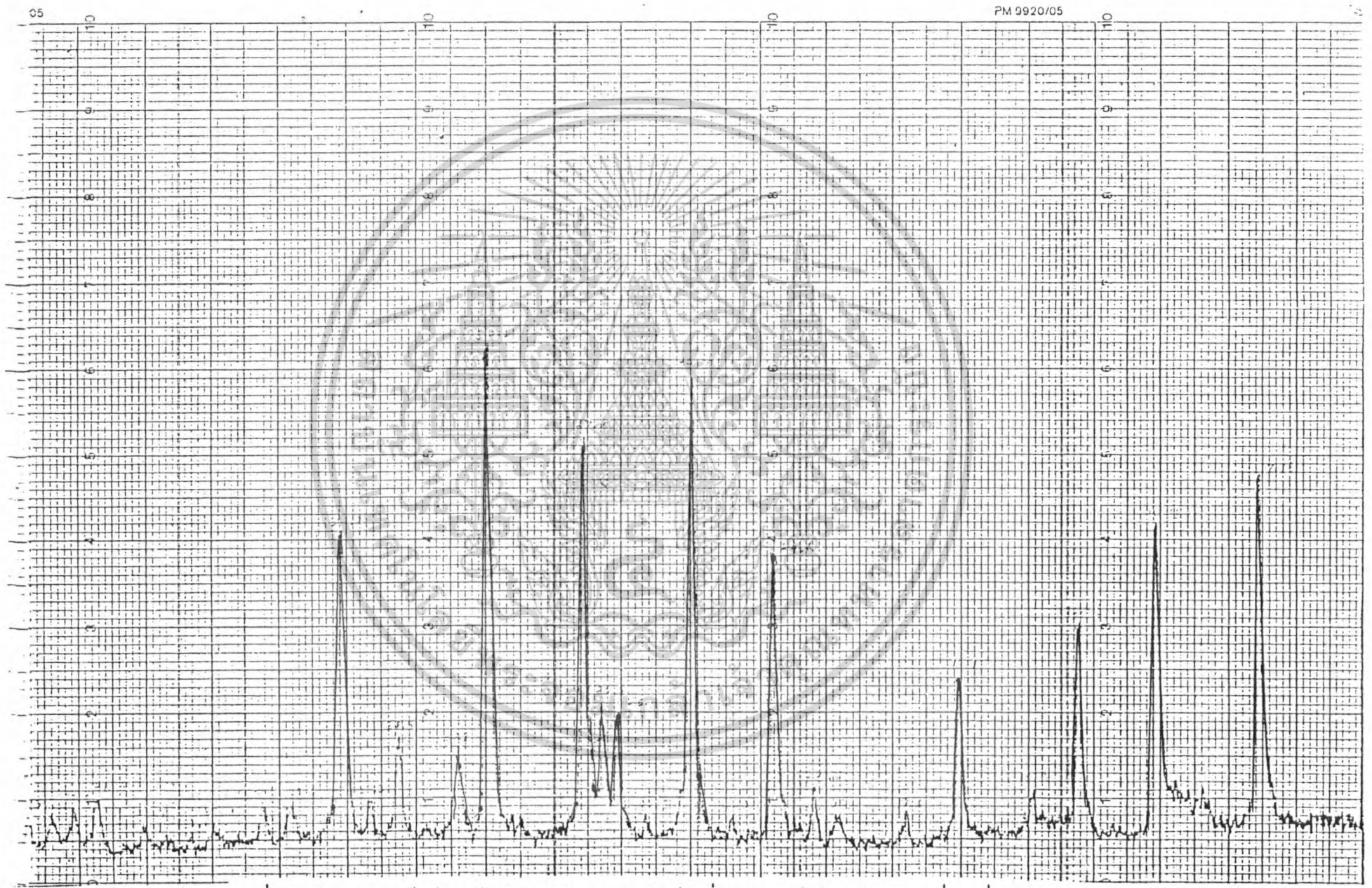
รูปที่ 4.14 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟเฟรคชันของไฮดรอกซีโซดาไลซ์

PM 9920/05 ๓

PM 9920/05

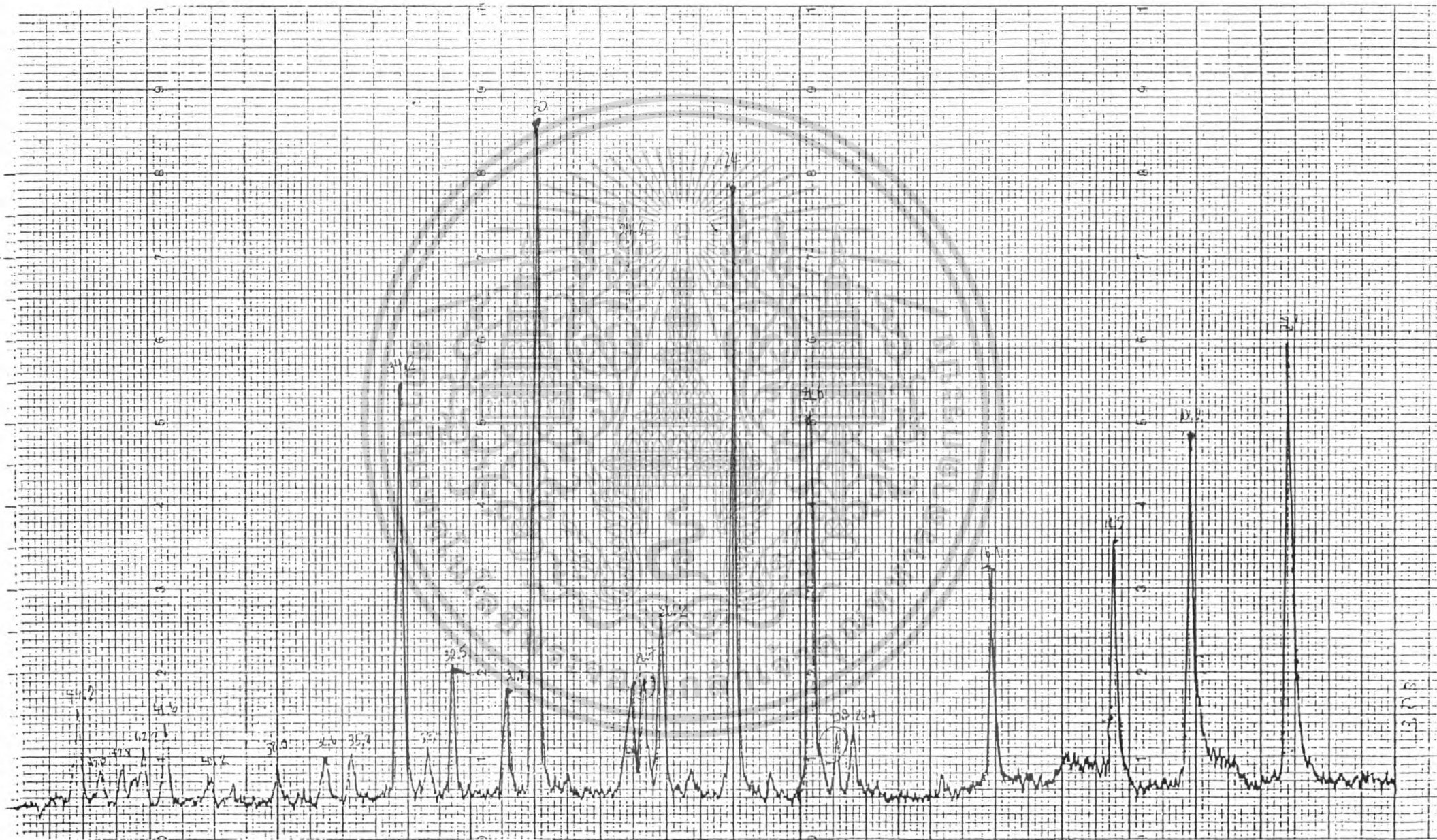


รูปที่ 4.15 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ได้จากดินระนองที่เผาที่อุณหภูมิ

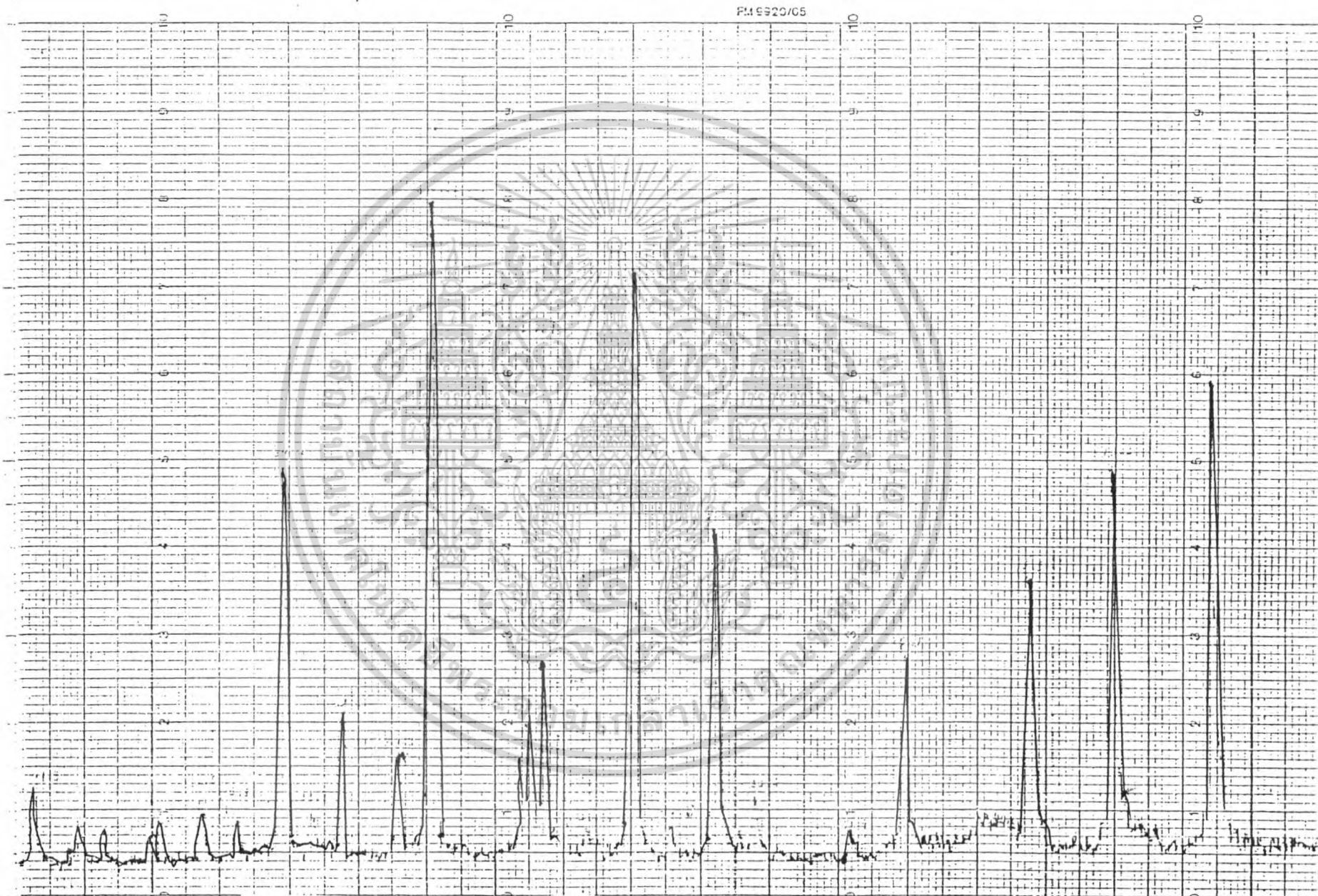


รูปที่ 4.16 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคชันของซิลิกาไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากดินระยองที่เผาที่อุณหภูมิ

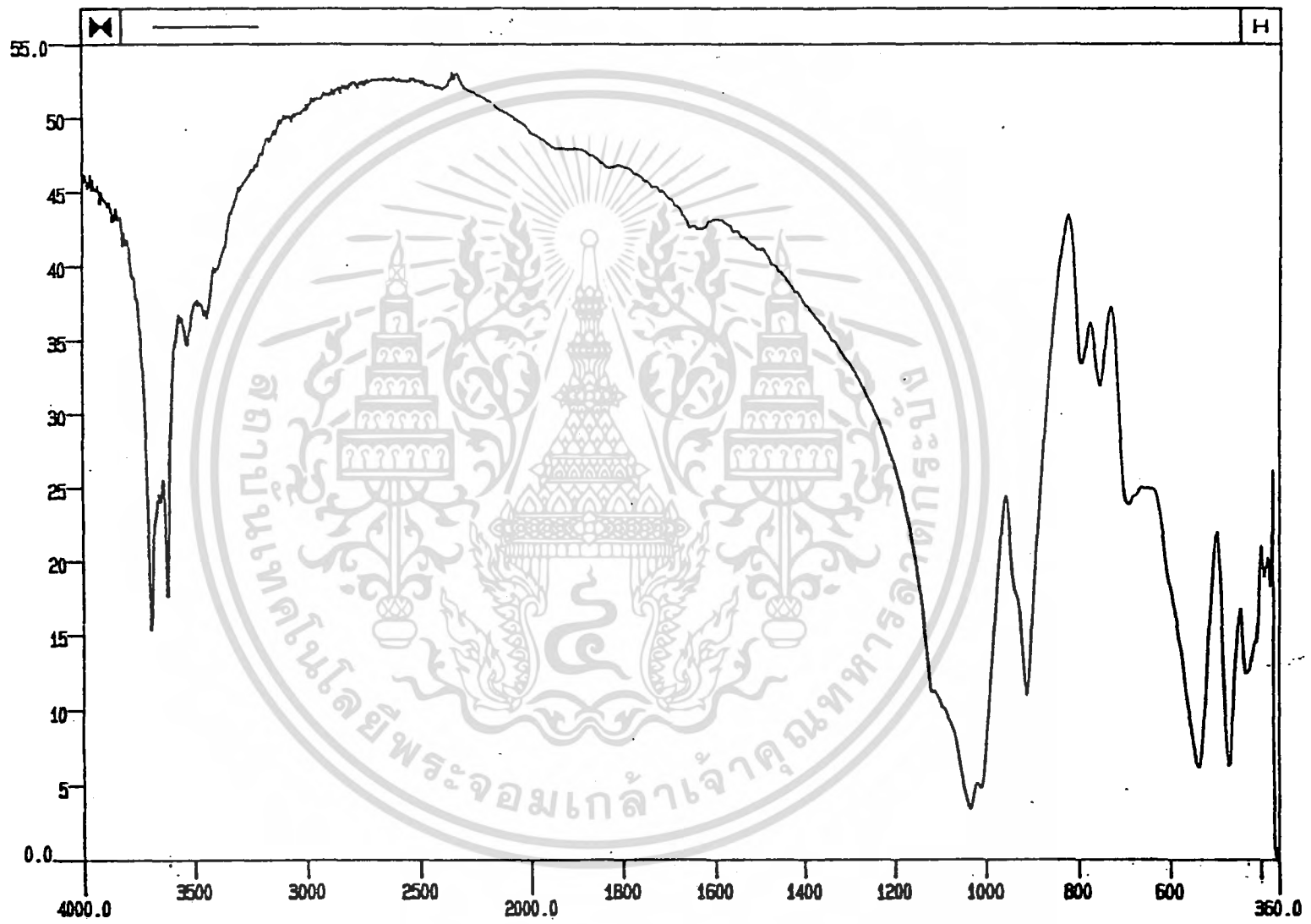
750°



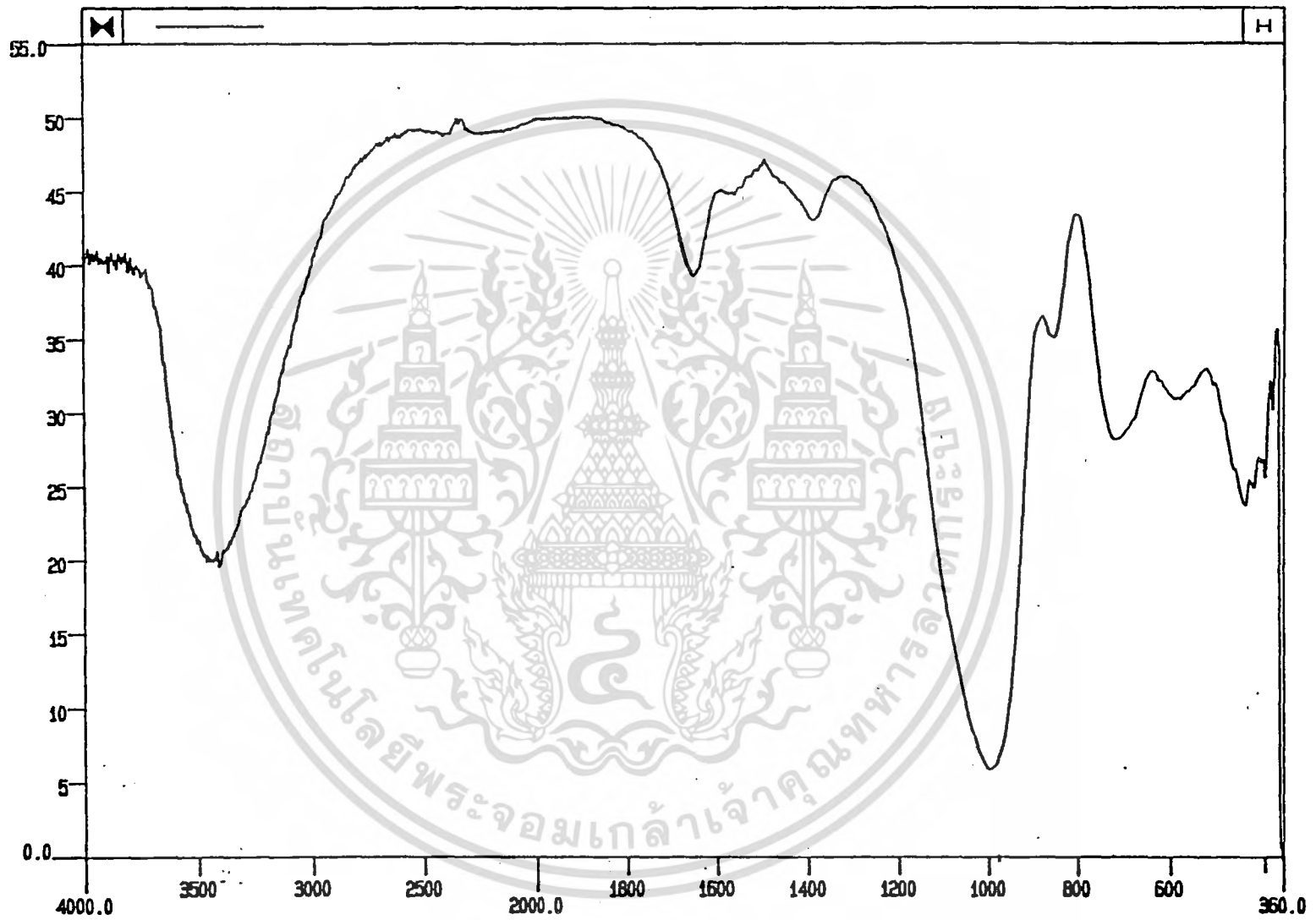
รูปที่ 4.17 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคชันของซีโอโลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินเหนียววอลที่เผาที่อุณหภูมิ



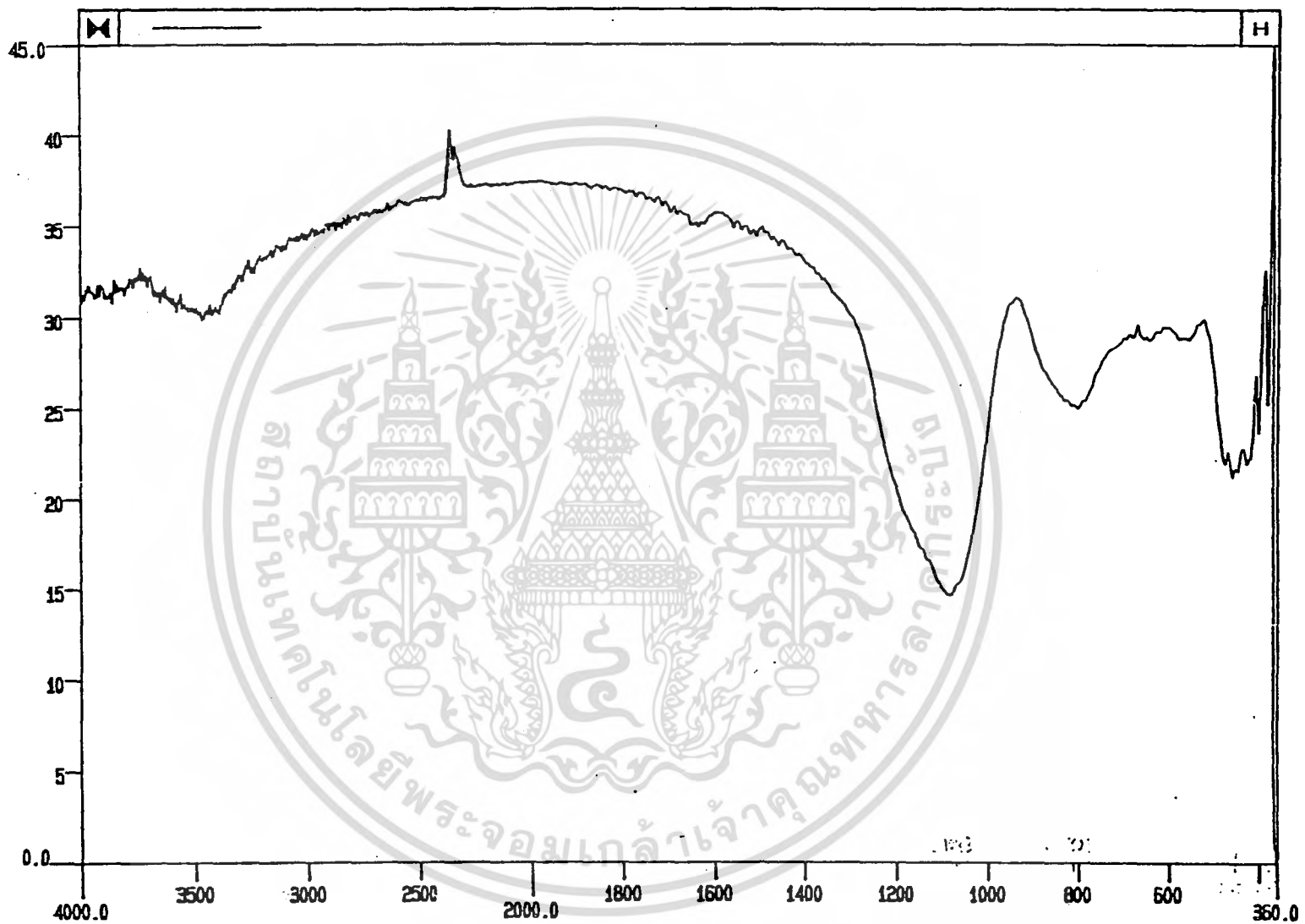
รูปที่ 4.18 รูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรชันของซีโวลต์เอทีสังเคราะห์ได้จากดินร่ำวาสที่เผาที่



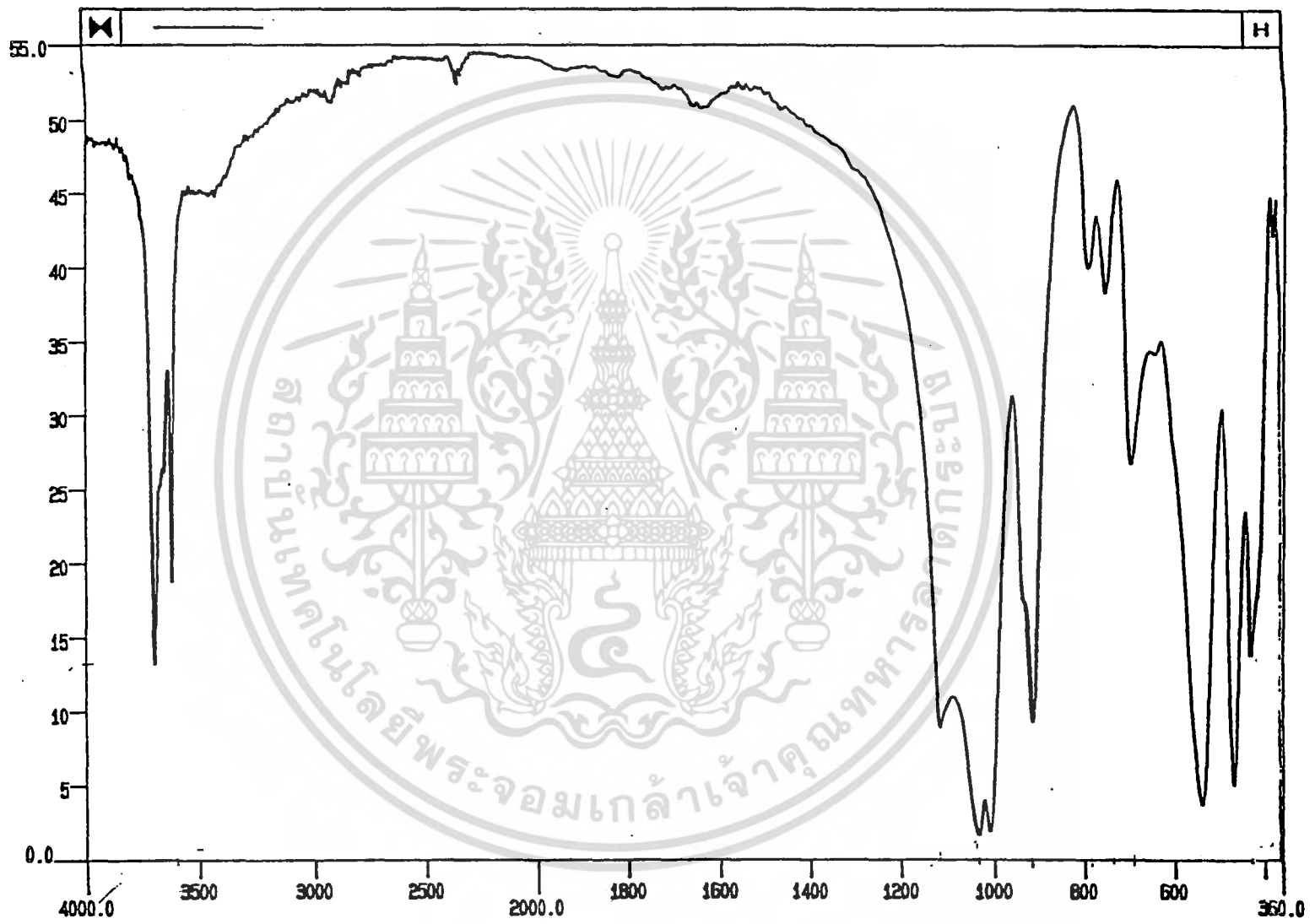
รูปที่ 4.19 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งระนองที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิห้อง



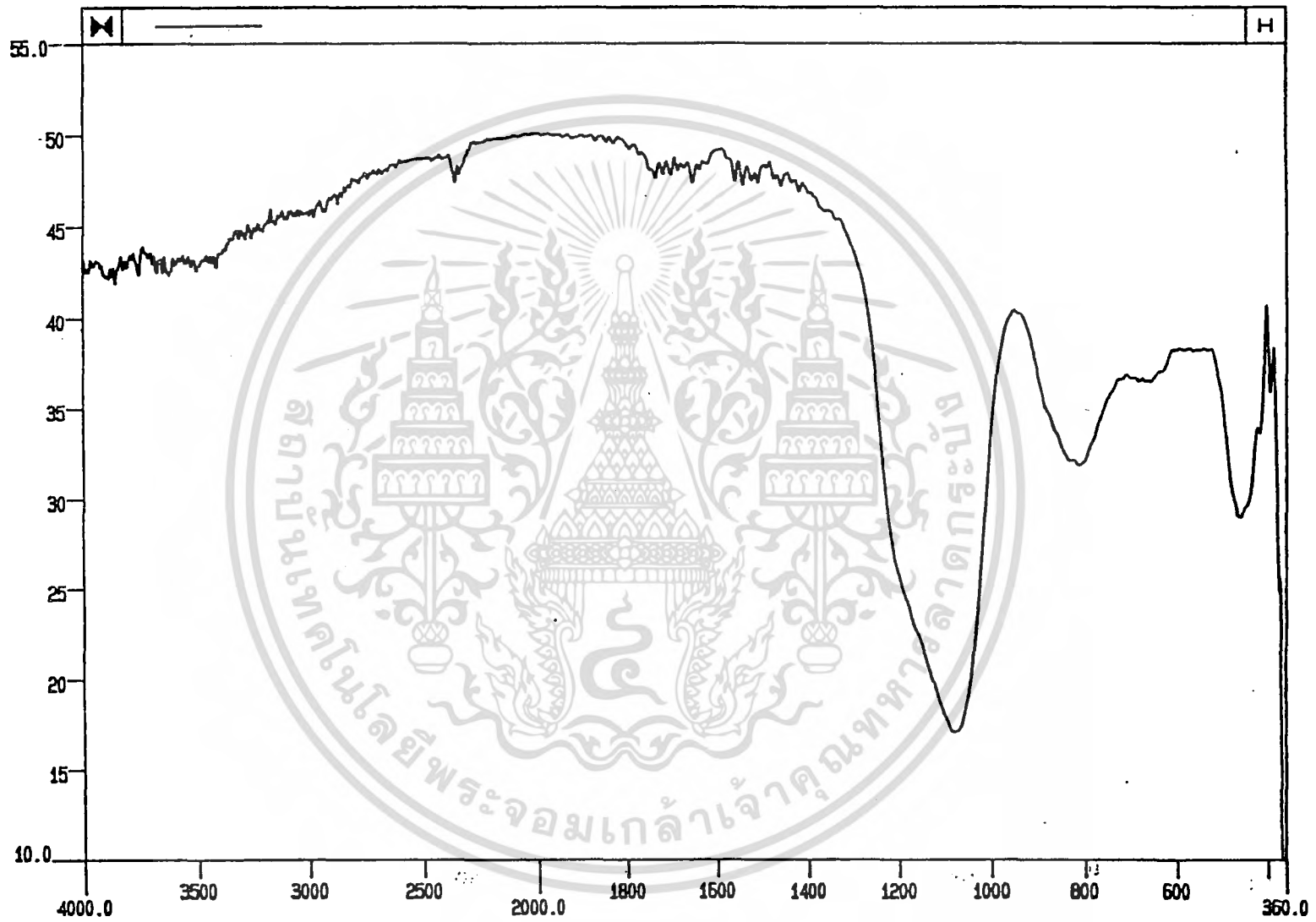
รูปที่ 4.20 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งระนองที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 650°c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



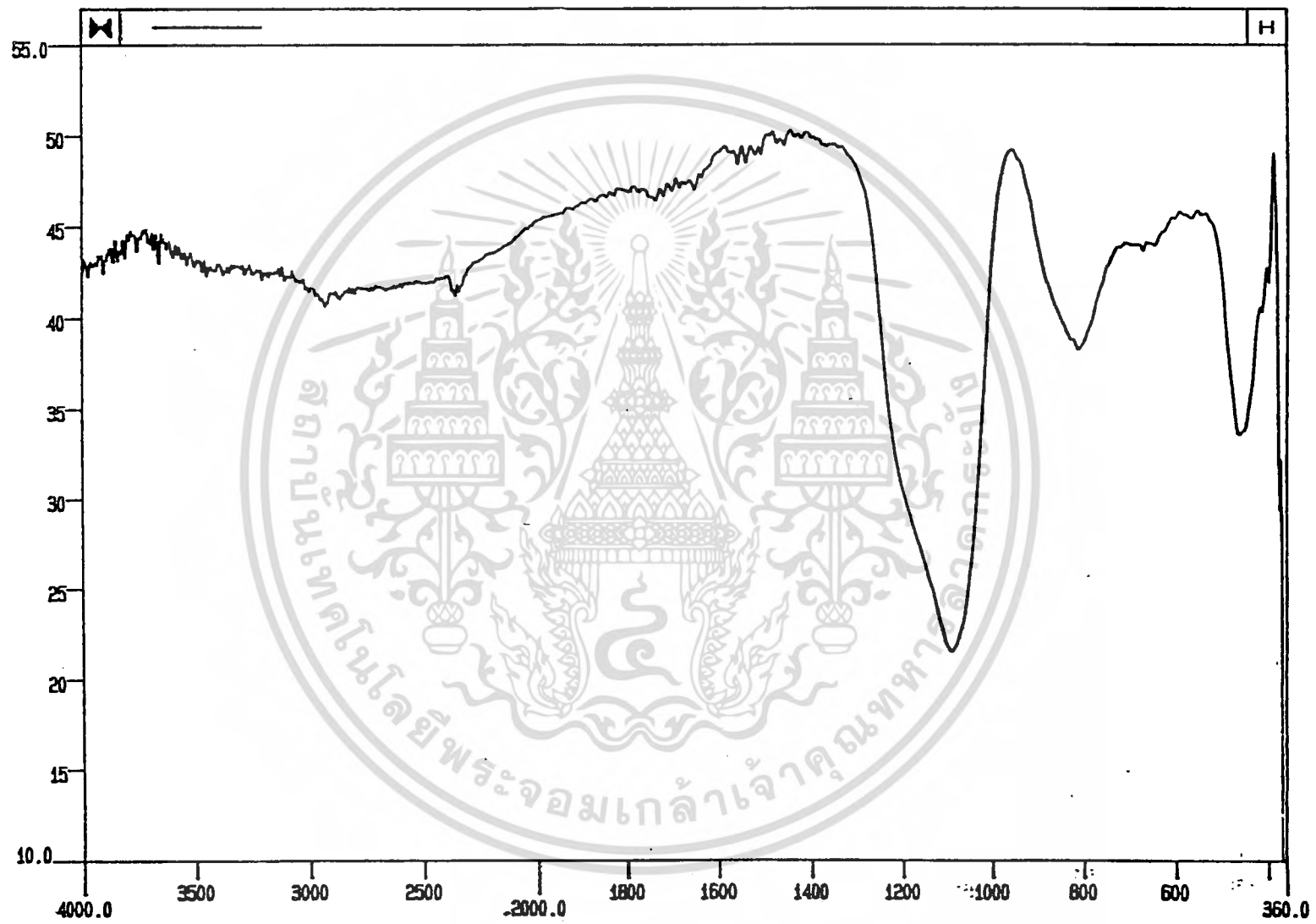
รูปที่ 4.21 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งระนองที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 750 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



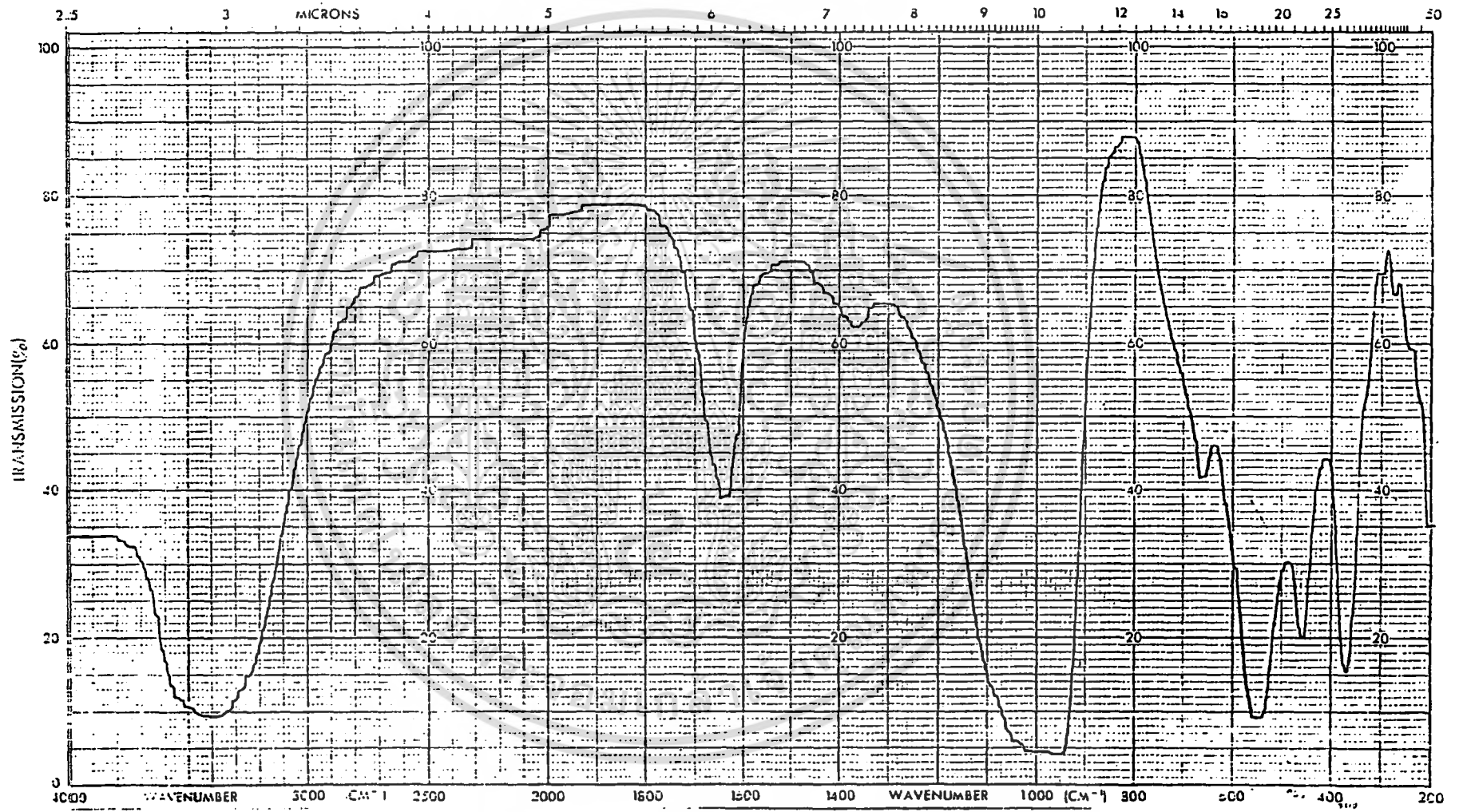
รูปที่ 4.22 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งเวธิวาสที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิห้อง



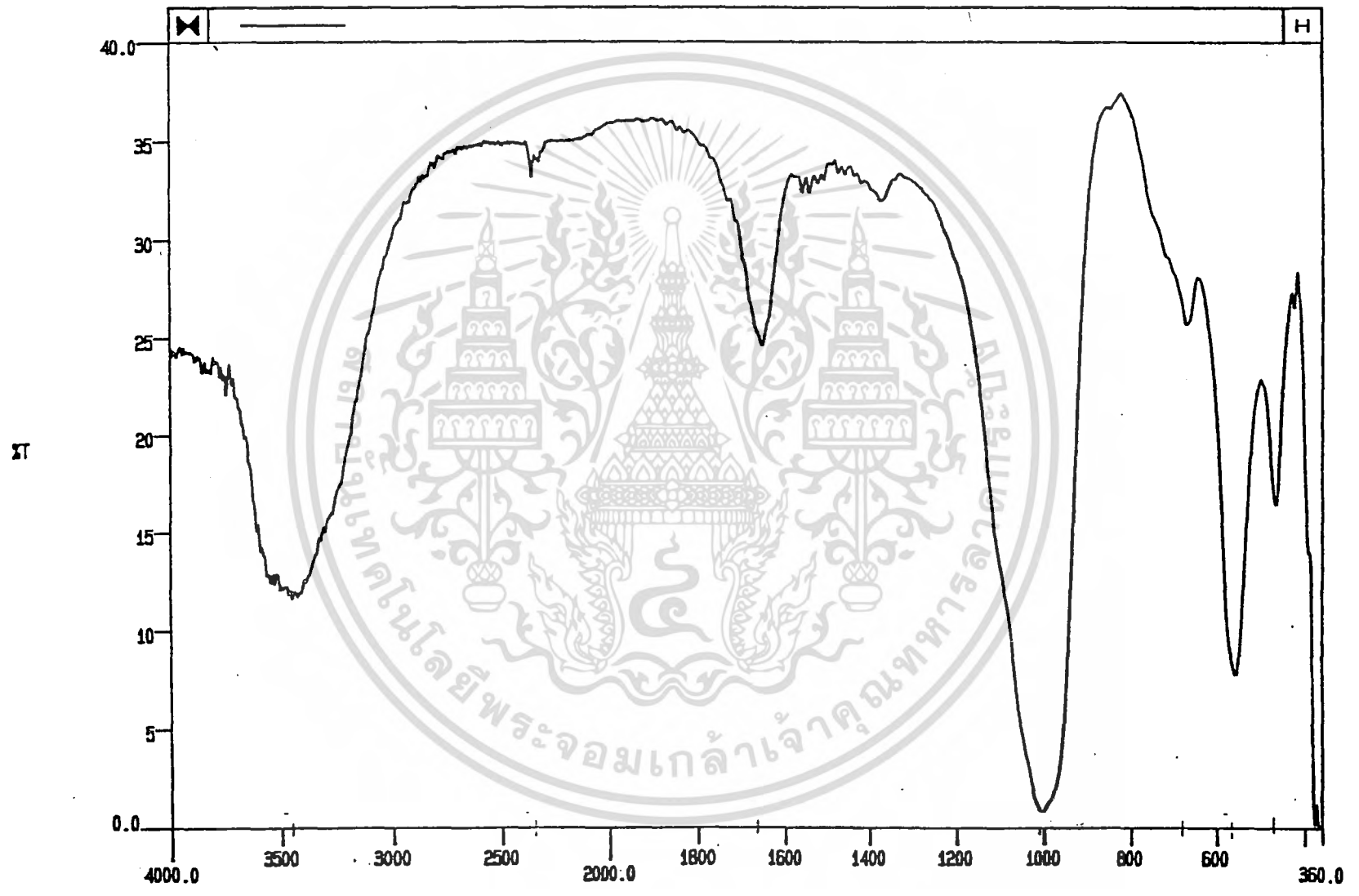
รูปที่ 4.23 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งนาธิวาสที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 650°c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24 สเปกตรัม IR ของดินขาวจากแหล่งนราธิวาสที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 750 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

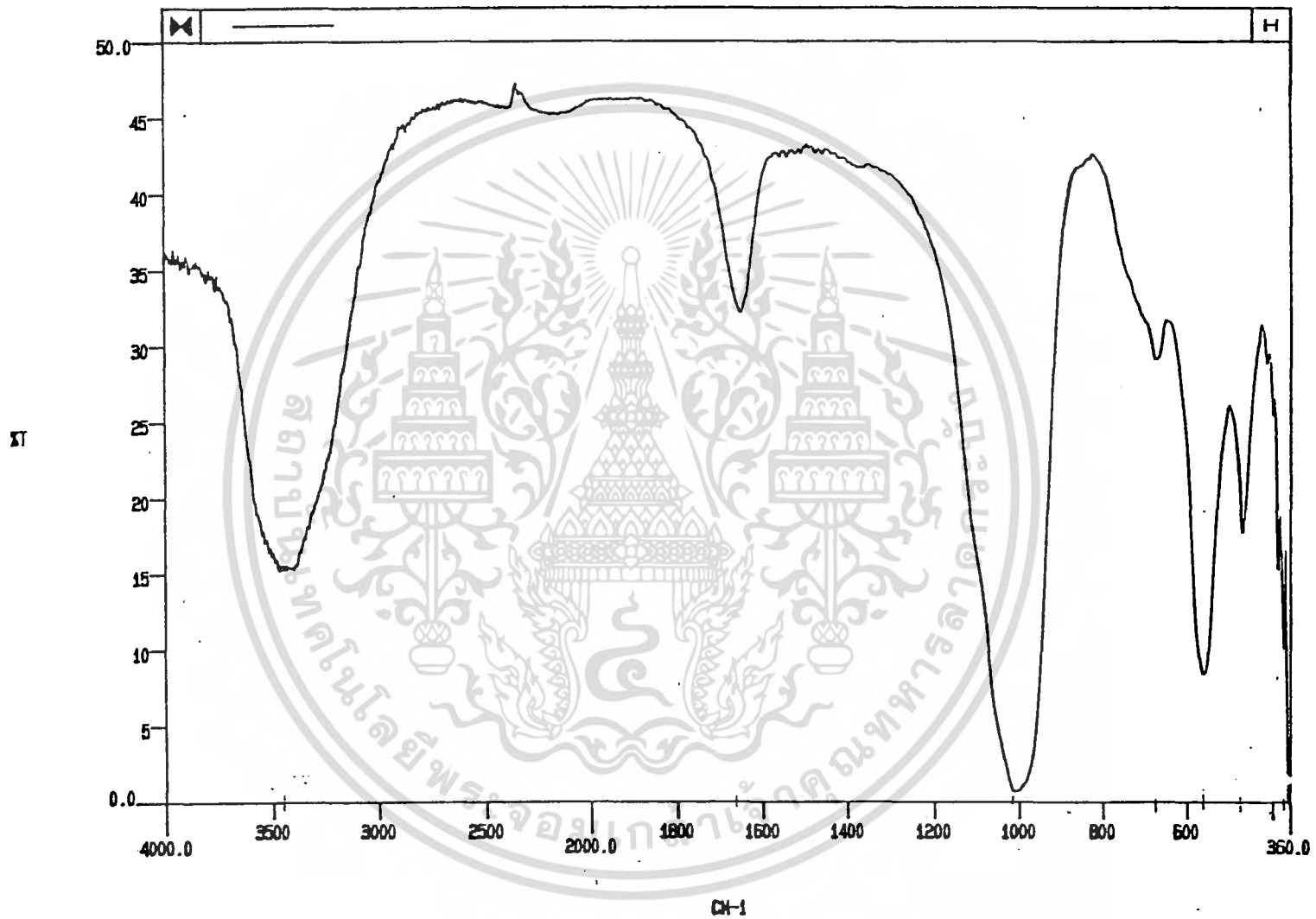


รูปที่ 4.25 สเปกตรัม IR ของซีโพลีเอมาตราบาน

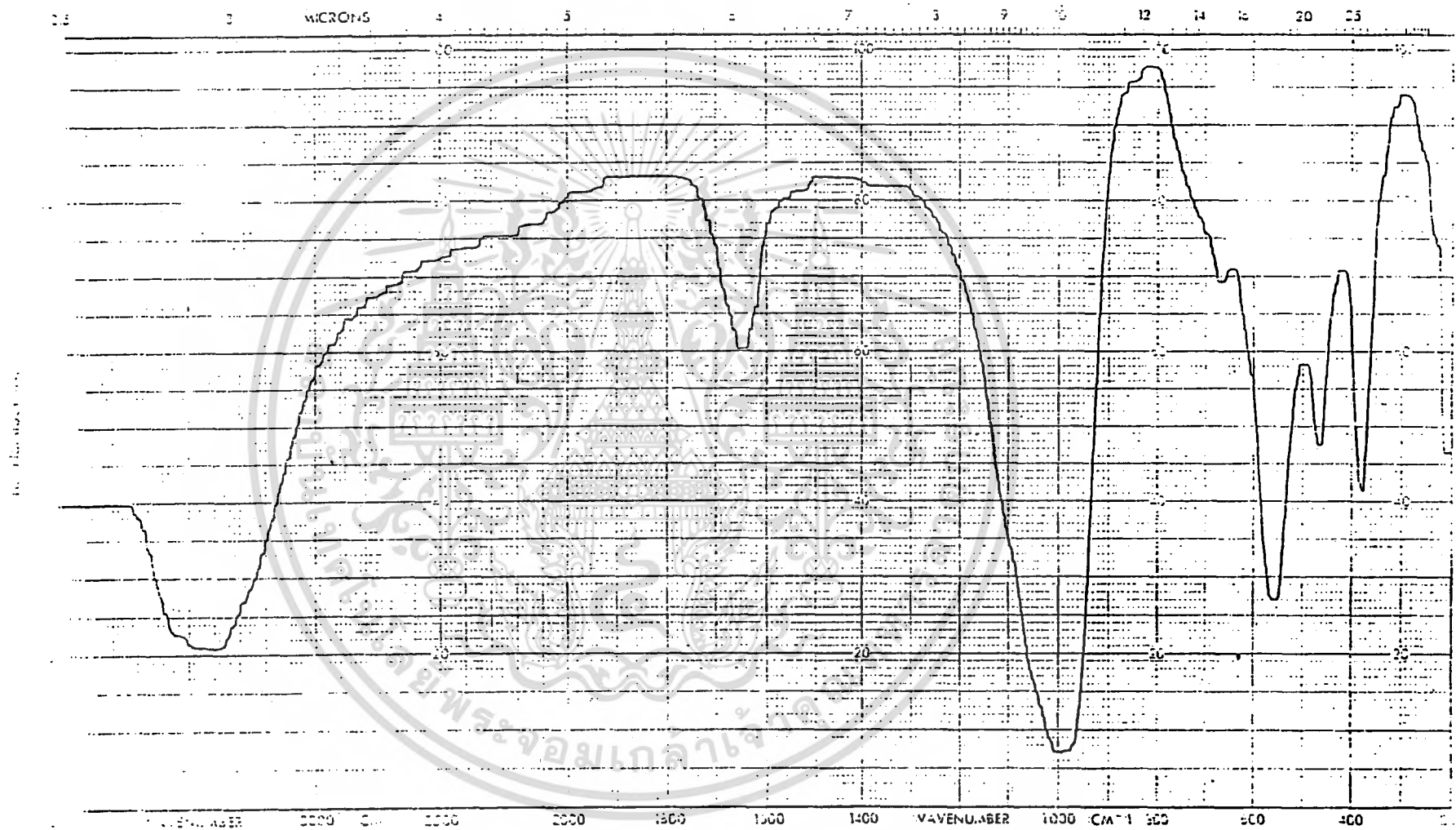


CM-1

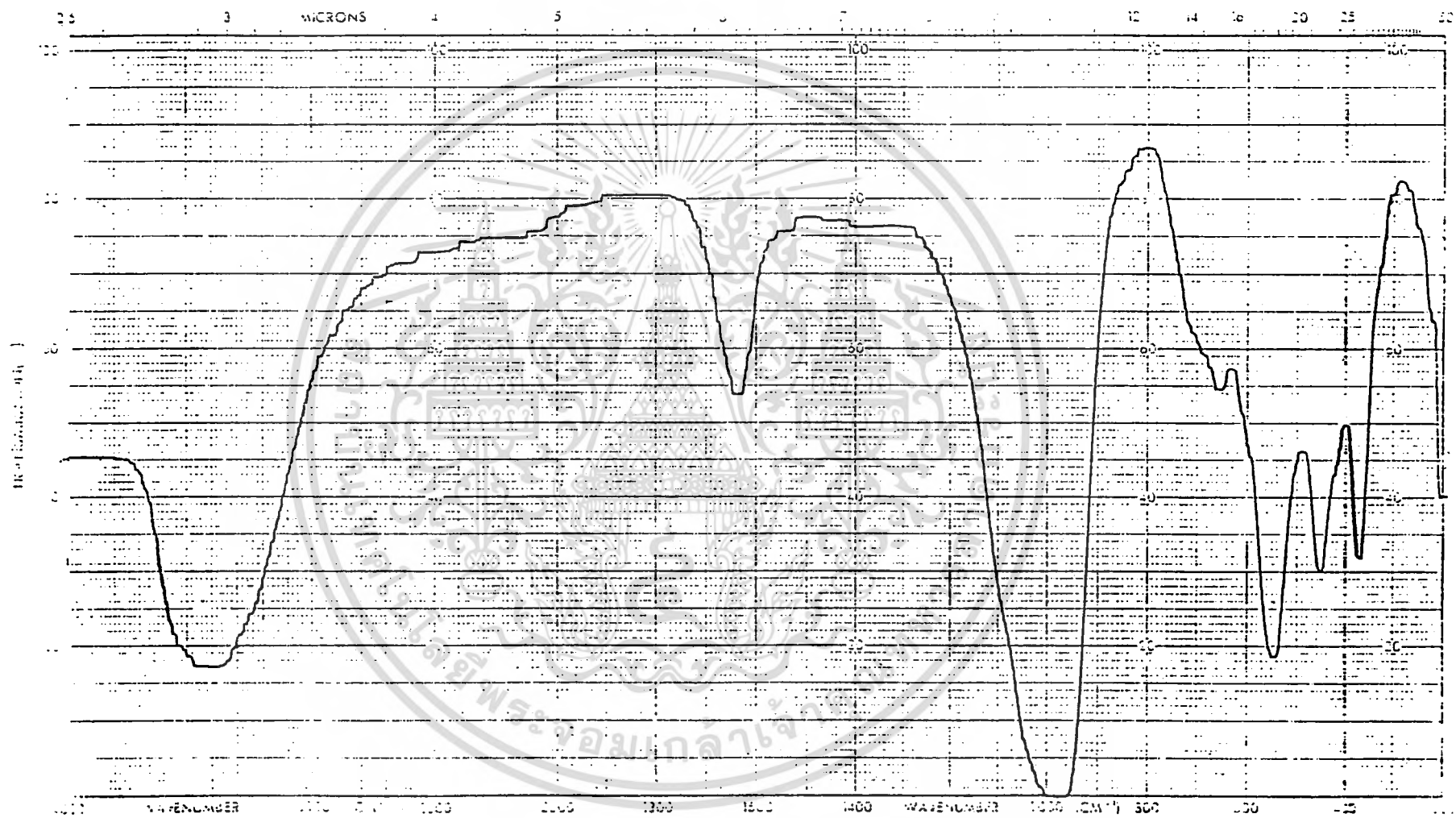
รูปที่ 4.26 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ได้ (18% NaOH 90<sup>o</sup>c-100<sup>o</sup>c)



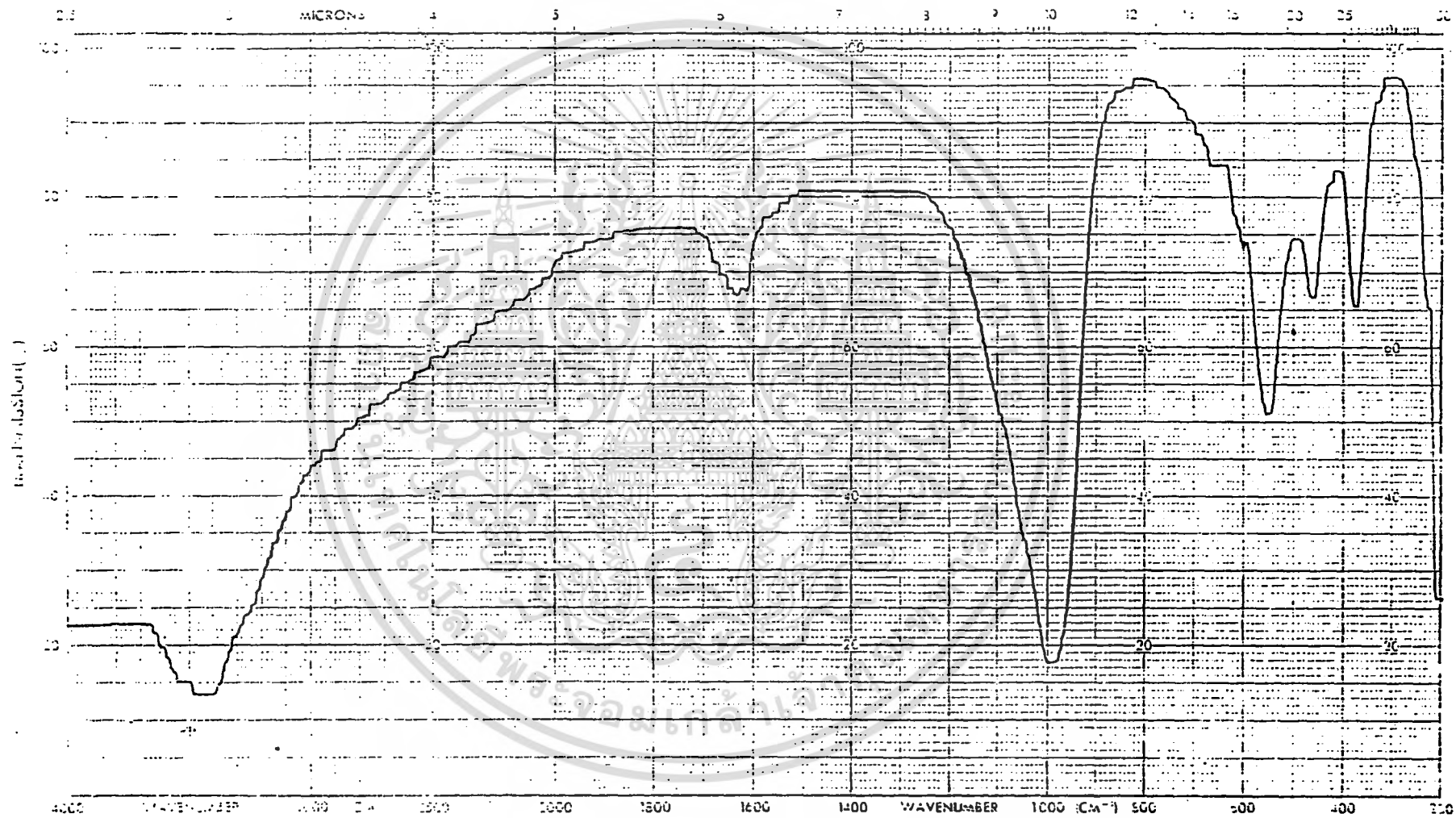
รูปที่ 4.27 สเปกตรัม IR ของซีโอโลต์เอทีสังเคราะห์ได้ (18% NaOH 70<sup>o</sup>c-90<sup>o</sup>c)



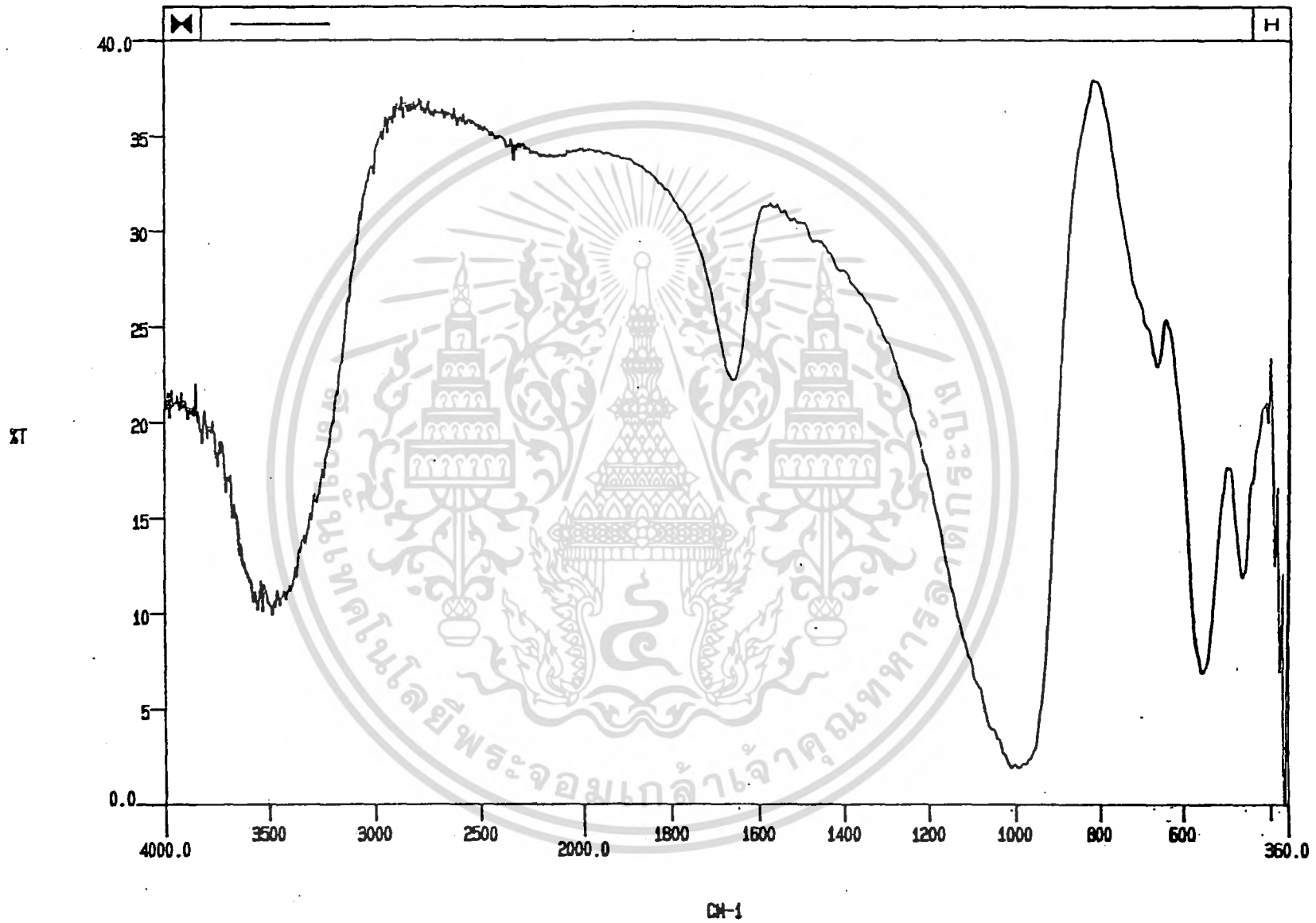
รูปที่ 4.28 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (14% NaOH 70°c-90°c)



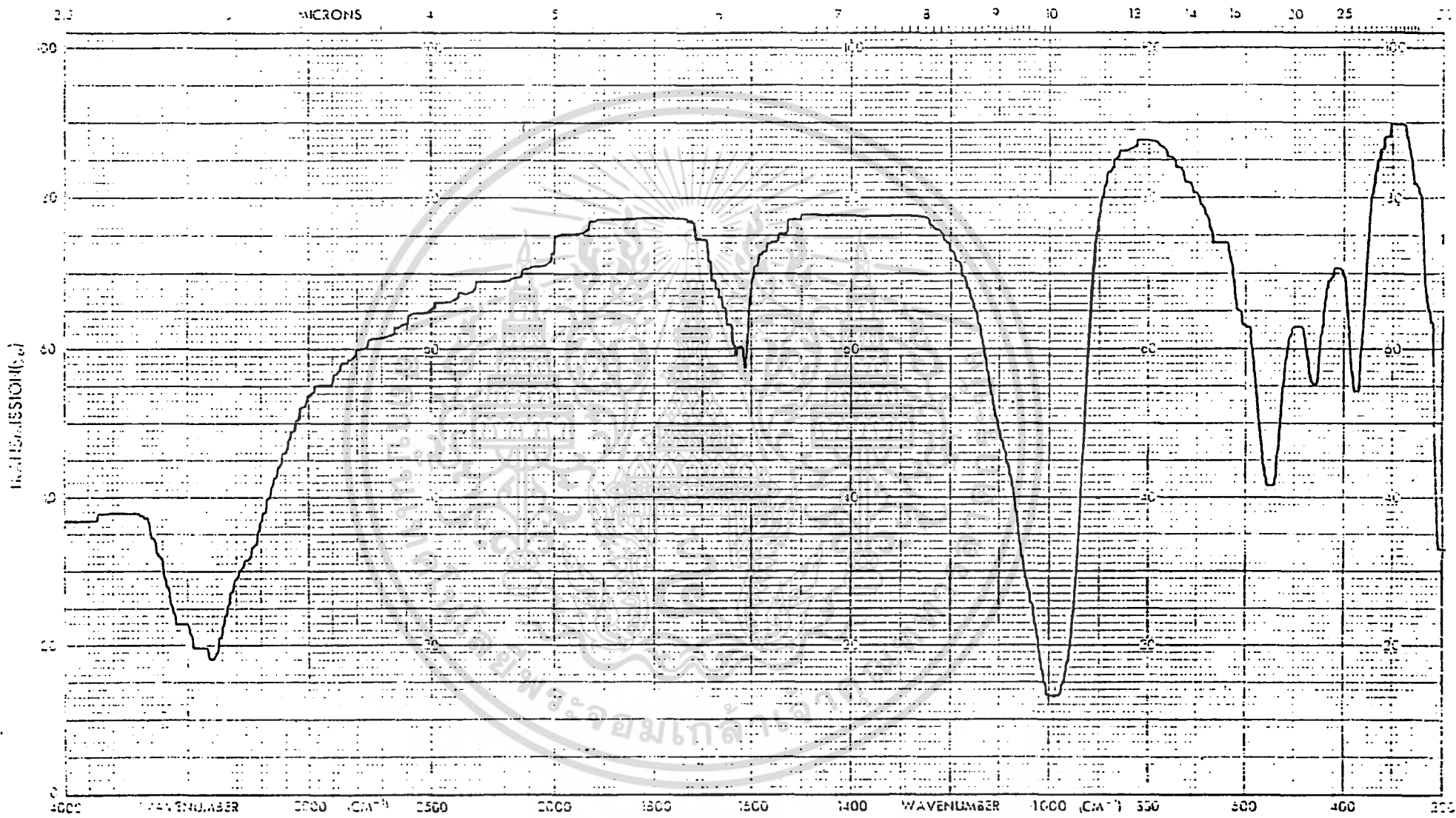
รูปที่ 4.29 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ (14% NaOH 90<sup>o</sup>c-100<sup>o</sup>c)



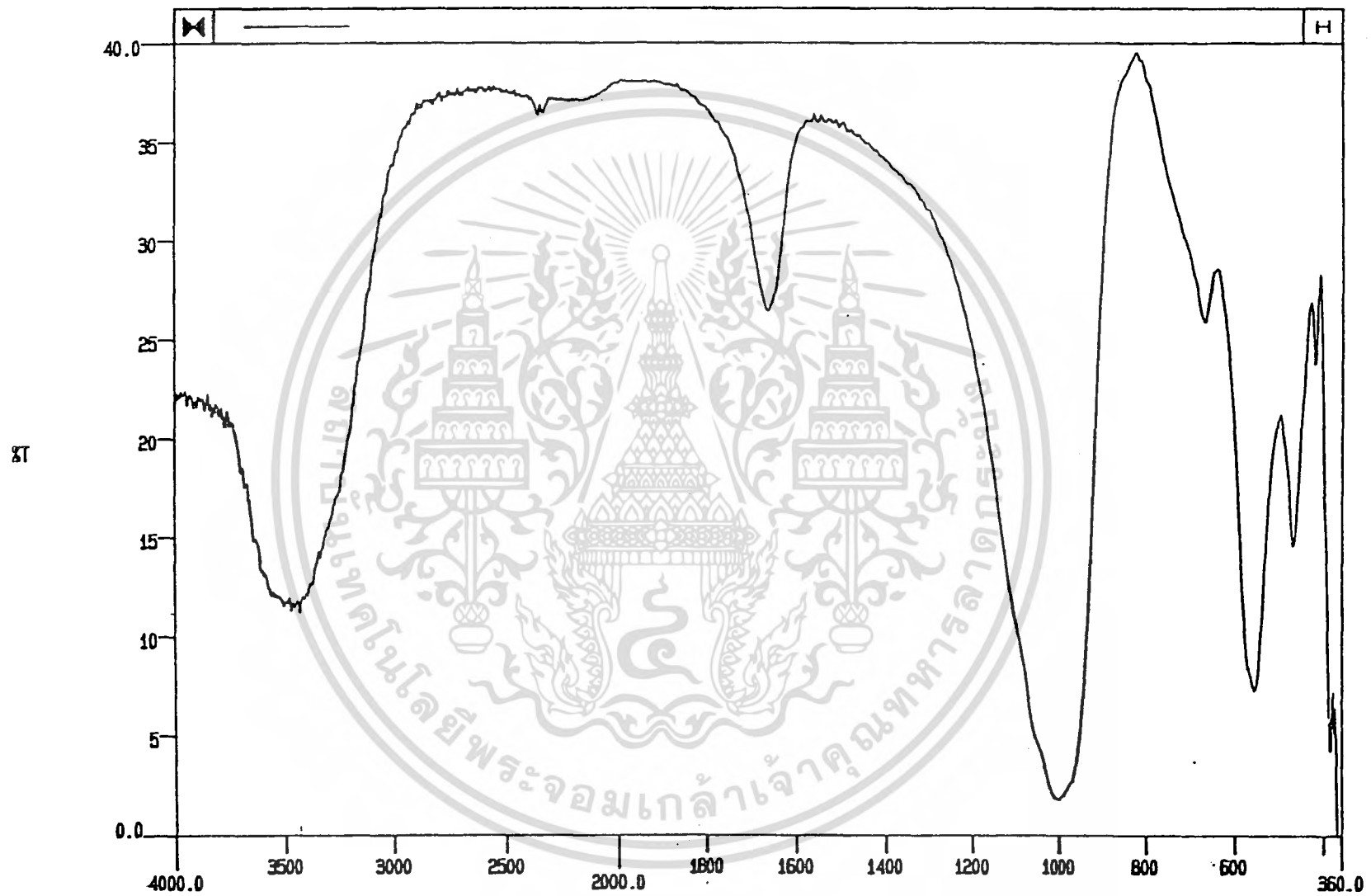
รูปที่ 4.30 สเปกตรัม IR ของซีอาไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระนองที่เผาที่อุณหภูมิ 650° c



รูปที่ 4.31 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินระยองที่เผาที่อุณหภูมิ 750<sup>o</sup>c



รูปที่ 4.32 สเปกตรัม IR ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินเหนียววาสที่เผาที่อุณหภูมิ 650°C



CH-1

รูปที่ 4.33 สเปกตรัม IR ของซีโอไซด์เอที่สังเคราะห์ได้จากดินเหนียวสีที่เผาที่อุณหภูมิ 750 °C

## เอกสารอ้างอิง

1. Kerr, G.T. "Synthetic Zeolites" Sci. Amer. 12 (1989):82-87
2. Way, J.T. "Power of Soils to Absorb Manure" J.R. Agric. Soc. 11 (1850):313-379
3. Weigel, O. and E. Steinhoff., "Adsorption of Organic Liquid Vapors by Chabazite" Z. Kristallogr. 61(1925):125-154
4. Breck, D.W. in Synthetic Zeolites, Properties and Applications. p.32. AIME preprint 73 H36, England, 1973.
5. Barrer, R.M. in Zeolites and Clay Minerals as Sorbents and Molecular Sieves. p.499. Academic Press, England, 1978.
6. Breck, D.W. in Zeolites Molecular Sieves. p.759. Academic Press, Wiley, England, 1974.
7. Bruno, W. Surface Chemistry, in Surfactants and Detergents. p.255., Chulalongkorn University, Bangkok, 1978.
8. Power, T. "Water Treatment- Clarifying the Market for Minerals" Ind. Miner. 215 (1985):35-52.
9. Munyston, F.A. Natural Zeolites, in A new Industrial Mineral Commodity (Sand, L.B. and Mumpton, F.A. eds.) pp.3-27. Pergamon, 1978.
10. Fitton, R.C. and Flore, B.A. "Preparation of Improved Zeolites" U.S. Pat.4075280, Feb.21, 1978.
11. Kiczek, A.P. and Salmen, L.A. and Tower, C.B. "Process for Making High Solids content Zeolite A -Alkylbenzene Sulfonate compositions suitable for use in making spray dried detergent compositions" U.S. Pat.4415489, Nov.15, 1983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

12. Milton, R.M. "Crystalline Zeolite", J. Am. Chem. Soc. 78 (1956):5963-5977.
13. Kirk-Othmer, "Molecular Sieves" in Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd ed., vol 15 pp.638-699, Wiley Interscience, New York, 1981.
14. Chanakya, M. Industrial Alumina Chemicals in American Chemical Society, pp.151-155, Washington D.C., 1986.
15. Brindley, G.W. the X-ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals, (Brown, G., 2d ed.) vol.21 pp.167-168. London, 1961.

16.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเรียกชื่อ Zeolite

การบ่งบอกถึงสมบัติเฉพาะตัวหรือบ่งบอกว่า เป็นสารตัวใดของสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต เป็นไปได้ยากถ้าขาดการบ่งบอกชื่อในระบบเคมีที่เฉพาะ อย่างหนึ่งอาจจากระบบเรียกชื่อของ IUPAC ซึ่งเรียกตามส่วนประกอบของยูนิเตเซลล์ เช่น แร่ analcime มีสูตร  $Na_{16}(AlO_2)_{16}(SiO_2)_{32} \cdot 16H_2O$  ก็จะเรียกว่า แซเตียม 16 - อลูมิเนียม - 32 - ซิลิเกต - 16 - น้ำ Jadeite มีสูตร  $Na_4Al_4Si_8O_{24}$  ซึ่งเรียกว่าแซเตียม 4 อลูมิเนียม - 8 - ซิลิเกต ซึ่งแร่ทั้งสองมีอัตราส่วนของส่วนประกอบเมื่อกำหนดน้ำหนักแล้วเหมือนกัน คือ  $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$  ระบบเรียกชื่อแบบ IUPAC นี้ไม่นิยมและไม่บอกถึงรายละเอียดอื่น ๆ ของยูนิเตเซลล์นั้น ๆ

นอกจากนี้ยังมีการตั้งชื่ออื่น ๆ อีกหลายระบบซึ่งบ่งถึงชนิดที่สังเคราะห์ได้จากสัณฐานกับแร่ชนิดไหนโดยใช้ข้อมูลจาก X-rays Powder ที่เหมือนกัน หรืออาจตั้งชื่อตามตัวย่อของผู้สังเคราะห์ได้ ซึ่งหลายครั้งที่มีชื่อใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจึงมีการตั้งระบบการเรียกชื่อของซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้รหัสและคุณสมบัติเป็นตัวแบ่งแยกซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ซีโอไลต์สังเคราะห์จะถูกตั้งชื่อซ้ำตามตัวย่อของผู้ค้นพบคนแรก เช่น ซีโอไลต์เอ, ซีโอไลต์เค-5, ซีโอไลต์ แซ็คเค-5 เป็นต้น
2. ตัวย่อชื่อของซีโอไลต์บ่งถึงการสังเคราะห์ เช่น ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่มีสูตรเป็น  $Na_{12} [(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}] \cdot 27H_2O$  ซึ่งเตรียมได้ในระบบของ  $Na_2O, Al_2O_3, SiO_2, H_2O$  สูตรนี้จะบ่งถึงส่วนประกอบสำคัญซึ่งอาจจะเรียกอยู่ในเทอมของ "type A" และ "type X" เป็นต้น
3. ในบางกรณีโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์คล้ายกับโครงสร้างของแร่ที่มีในธรรมชาติเช่น มอร์ดินไท์สังเคราะห์ เราจะเรียกซีโอไลต์สังเคราะห์ว่า "mordenite-type" โดยไม่คำนึงถึงการกระจายตัวของ ซิลิกอน และ อลูมิเนียม หรืออัตราส่วนระหว่าง ซิลิกอน ต่อ อลูมิเนียม
4. ในกรณีที่เลี้ยงไม่ได้ ซีโอไลต์สังเคราะห์บางชนิดที่มีชื่อหลายชื่อให้ใช้ชื่อที่คนนิยมมากที่สุด

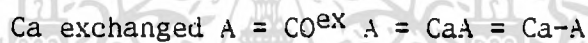
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ในกรณีที่มีโครงสร้งหลักมีสารอื่นนอกจาก อลูมิเนียม และ ซิลิกอน เช่น P, Ga, Ge จะใช้สัญลักษณ์ P เป็นคานาหน้า เช่น P-L จะบ่งถึง ซีโอโลต์ L ที่มีฟอสฟอรัสแทนอยู่ใน โครงสร้งหลัก อาจเขียนสูตรของยูนิตเซลล์เป็น  $K_{21}[AlO_2]_{34}(SiO_2)_{25}(PO_2)_{13} \cdot 42H_2O$

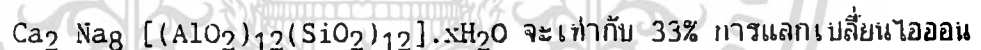
6. อาจมีความจำเป็นต้องบอกถึงอัตราส่วน Si/Al ในกรณีที่ซีโอโลต์ชนิดนั้นสามารถ เปลี่ยนแปลงส่วประกอบในโครงผลึกได้

7. บริษัทยูนิยามคาร์โลต์ คอบเบอเรชั่น ได้ปรับใช้ "X" สำหรับ ซีโอโลต์สังเคราะห์ ที่เตรียมโดยใช้อัลคิลแอมโมเนียมเบส เช่น "X-A" บ่งถึงเตตระเมทิลแอมโมเนียม ซีโอโลต์ โครงสร้งผลึกแบบ type A

8. เมื่อมีการเปลี่ยนไอออนบวกในซีโอโลต์ เช่น การเปลี่ยนของแคลเซียมไอออนของซีโอโลต์ เอ สามารถเขียนสั้นๆ ได้ว่า  $Ca^{ex}$  หรือ  $CaA$  ส่วนเครื่องหมาย "-" ระหว่างแคลเซียมและ เอ ( $Ca-A$ ) จะหมายถึงซีโอโลต์ชนิดอื่น



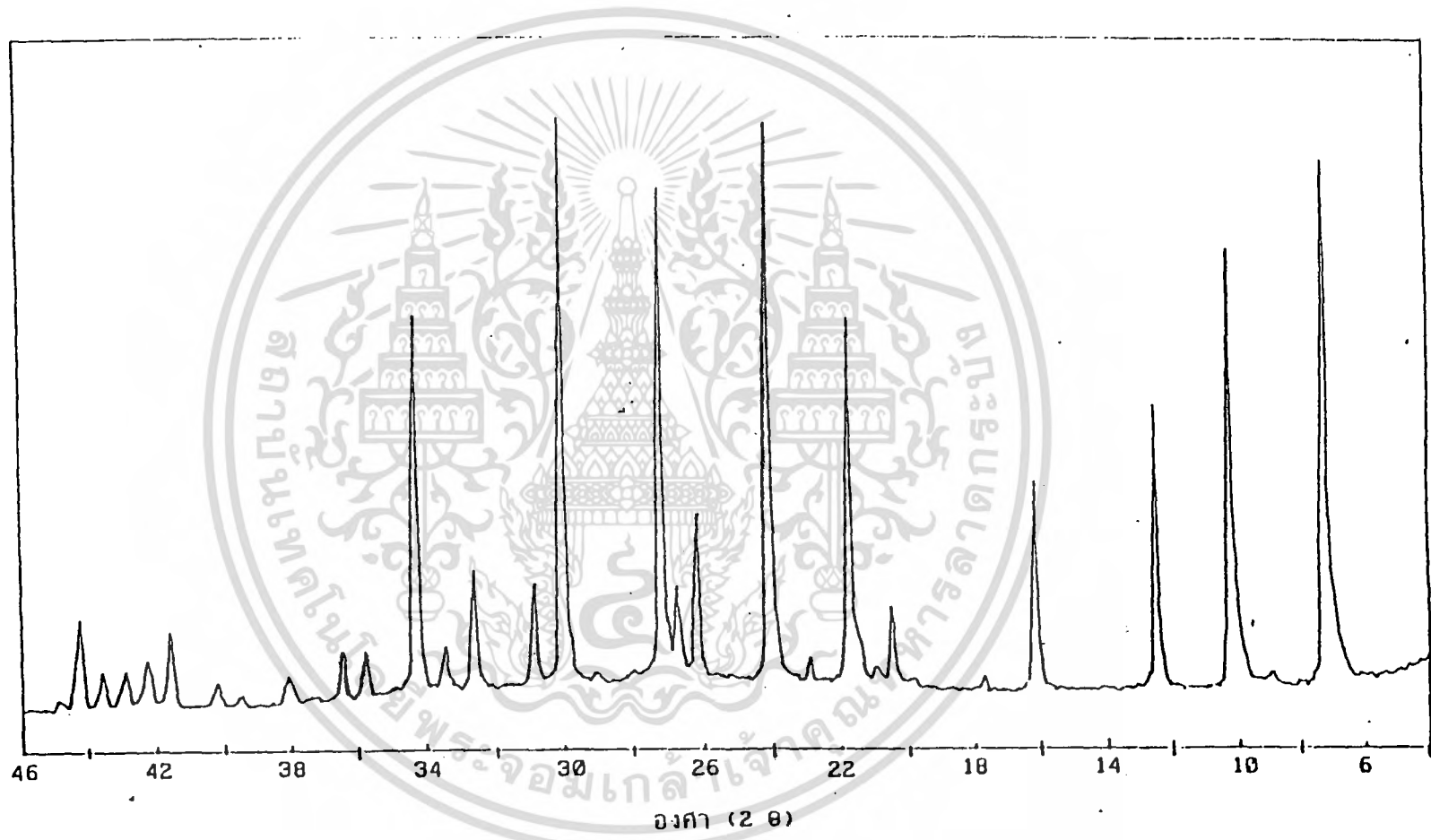
ในกรณีส่วนใหญ่จำเป็นต้องบอกองค์ประกอบของการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นเปอร์เซ็นต์ หรือ วรรณเลขของการแลกเปลี่ยน หรือในรูปของยูนิตเซลล์ เช่น



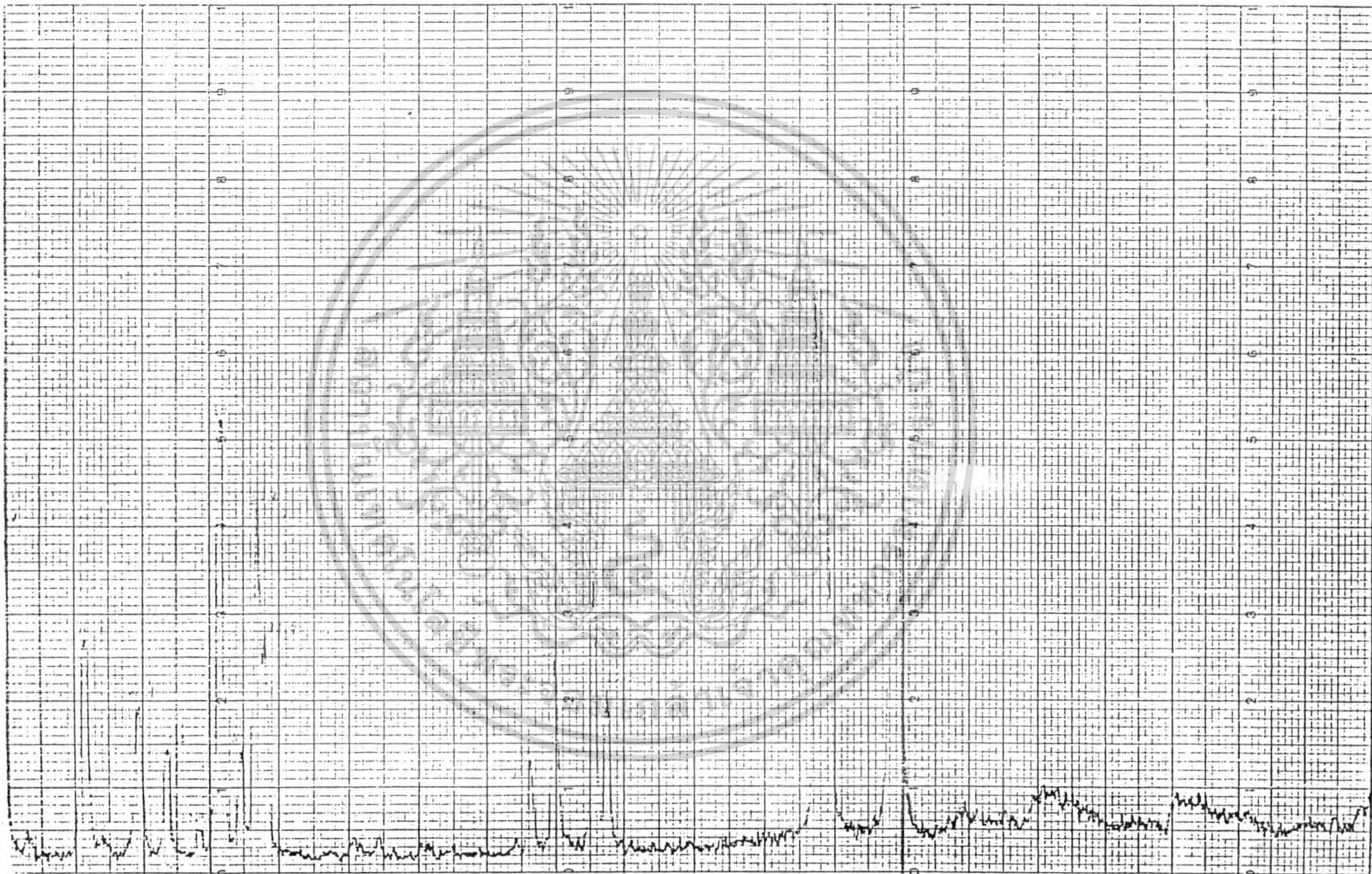
9. การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มซีโอโลต์ โดยการแลกเปลี่ยนไอออน การลดปริมาณอลูมินา การลดประจุบวกลง จำเป็นต้องระมัดระวังอย่างมาก

การศึกษาเรื่องซีโอโลต์จำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านโครงสร้ง ส่วนประกอบ และ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพซึ่งรวมถึง

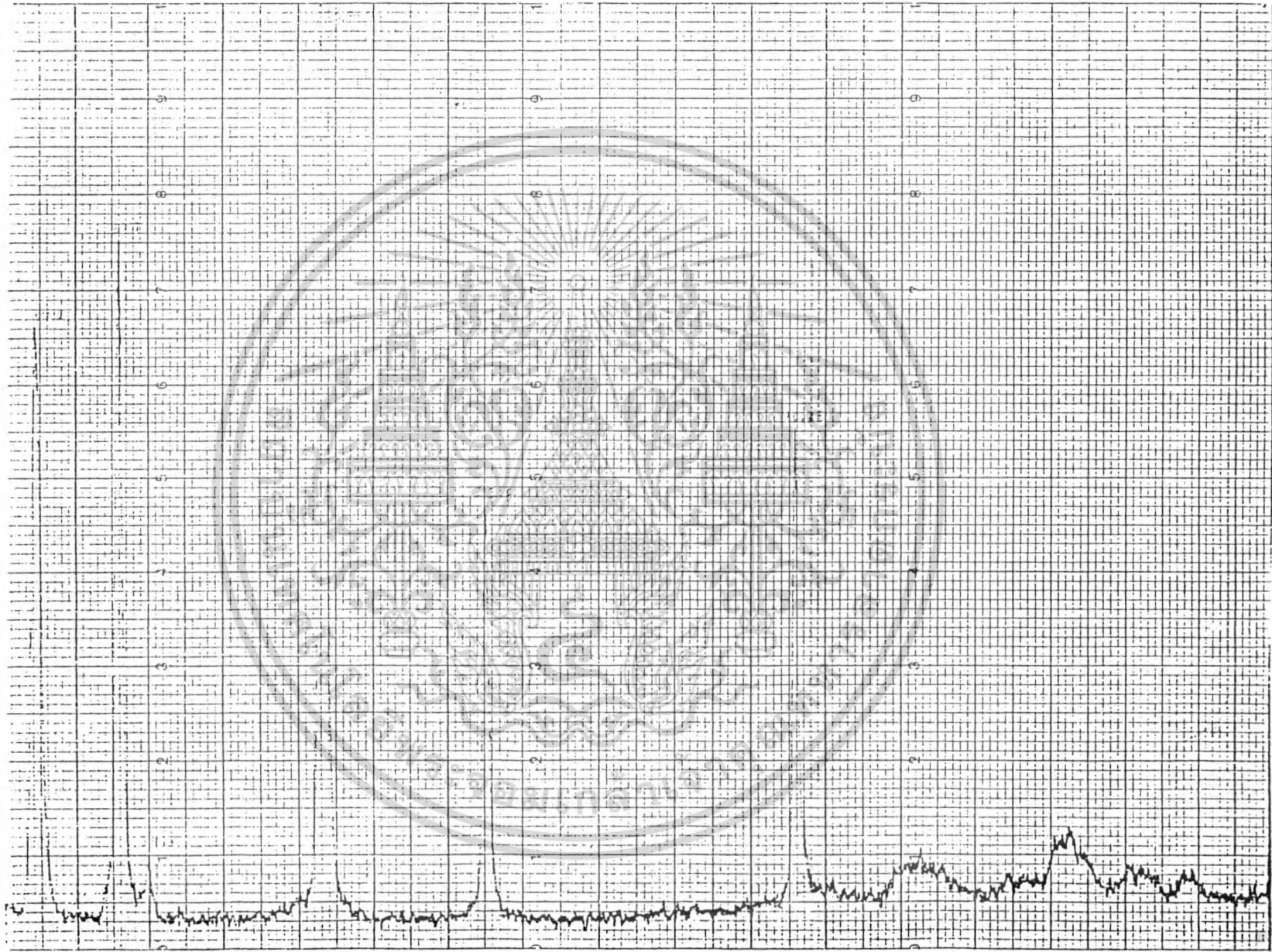
1. โครงสร้งพื้นฐานโดย X-ray crystallography
2. ส่วนประกอบทางเคมี
3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งบ่งบอกถึงซีโอโลต์ที่รวมถึง ความเสถียร สมบัติเมื่อถูกใส่หน้าออกไซด์แล้ว สมบัติการแลกเปลี่ยนประจุ และการดูดซับไอและแก๊ส



รูปที่ ก แสดงรูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ของทีโกลอสต์เฮลิ่งเคราะห์จากดินขาวของบริษัทยูเนียนคาร์ไบด์ จำกัด



รูปที่ ๗ แสดงรูปแบบเลี้ยว-เรย์ ของ  $Al(OH)_3$



รูปที่ ค แสดงรูปแบบเอ็กซ์-เรย์ ของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$